

**CONTROL DE GENERACIÓN DE CALAMINA EN HORNO DE LAMINACIÓN EN
CALIENTE DE MEPSA**

JONATHAN JAVIER BENAVIDES MENDOZA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE METALÚRGIA

TUNJA

2018

**CONTROL DE GENERACIÓN DE CALAMINA EN HORNO DE LAMINACIÓN EN
CALIENTE DE MEPSA**

JONATHAN JAVIER BENAVIDES MENDOZA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero metalúrgico

Directora

Dr.-Ing. LAIS MUJICA RONCERY

Ingeniera Química

Codirector

Ing. MARCO FIDEL SÁNCHEZ

Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE METALÚRGIA

TUNJA

2018

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del director

Tunja, 10 de agosto de 2018

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar hasta este día, guiando siempre mi camino ayunándome a tomar las mejores decisiones y acompañarme siempre en todo lugar.

A mis padres por el apoyo incondicional que me brindan todos los días, por darme fuerza en los momentos más difíciles de mi carrera, gracias por haberme inculcado los mejores valores y enseñarme las mejores lecciones de vida.

A mis amigos más cercanos, que en conjunto hemos llevado esta carrera a feliz término.

A Marílyn Reyes por la compañía, apoyo, consejo y cariño que me brindó durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a:

Ing. Marco Fidel Sánchez, que me brindó la oportunidad de desarrollar este proyecto en su empresa Metales y Procesos del Oriente S.A

Ing. Carlos Amézquita, por la ayuda brindada durante la elaboración de este proyecto con su amplio conocimiento y experiencia.

Ernesto Alfonzo por su consejo y ayuda con las dudas que se me presentaban día a día durante mi permanencia en la empresa MEPSA.

Dc. Lais Mujica, directora de este proyecto por su acompañamiento e instrucciones para el buen desarrollo de este proyecto.

Equipo de ingenieros, que durante mi carrera me dictaron las clases con las que adquirí el conocimiento suficiente para llevar a feliz término esta carrera.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. ALCANCES Y LIMITACIONES	18
3.1 ALCANCES	18
3.2 LIMITACIONES	18
4. JUSTIFICACIÓN.....	19
5. MARCO REFERENCIAL	20
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA METALES Y PROCESOS DEL ORIENTE S.A.....	20
5.2 PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE.....	20
5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LAMINADO EN LA EMPRESA METALES Y PROCESOS DEL ORIENTE S.A.	21
5.4 HORNO DE CALENTAMIENTO DE MEPSA	29
5.5 QUEMADORES HAUCK 780 SERIES.....	30
5.6 PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	33
5.7 COMBUSTIBLE FUEL OÍL N°6 USADO POR MEPSA.....	34
5.8 AIRE DE COMBUSTIÓN QUE ENTRA A LOS QUEMADORES	36
5.9 CASCARILLA DE LAMINACIÓN.....	37
5.10 FORMACIÓN DE CASCARILLA DE LAMINACIÓN	38

5.11 VARIABLES DEL PROCESO QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE CALAMINA EN LOS HORNOS DE CALENTAMIENTO	38
5.12 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	40
5.12.1 Conducción.....	40
5.12.2 Convección	40
5.12.3 Radiación.....	41
5.13 INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	41
5.13.1 Tipos de intercambiadores de calor según su construcción	42
5.13.2 Tipos de intercambiadores de calor según su operación.....	43
6. METODOLOGÍA.....	45
6.1 RECOPIACIÓN DE DATOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE DE MEPSA.....	45
6.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES QUE GENERAN OXIDACIÓN EN LA PALANQUILLA	46
6.3 CONDICIONES CON LAS CUALES DEBE TRABAJAR EL HORNO DE CALENTAMIENTO	47
6.3.1 Tiempo de permanencia de la palanquilla en el horno	47
6.3.2 Volumen de aire necesario para la combustión.....	47
6.3.3 Calor necesario para el calentamiento de las palanquillas	48
6.3.4 Pérdidas de calor por paredes y techo del horno	49
6.3.5 Calor total suministrado al horno para su operación	53
6.3.6 Cantidad de combustible.....	53
6.3.7 Cantidad de aire que debe ser suministrado	55
6.4 CONDICIONES ACTUALES EN LAS QUE TRABAJA EL HORNO DE CALENTAMIENTO	55
6.5 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE LIMPIEZA DEL HORNO	56
6.6 DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	56

6.6.1 Caudal másico	57
6.6.2 Delta de temperatura	58
6.6.3 Promedio de flujo de calor	58
6.6.4 Diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (Log Mean Temperature Difference)	59
6.6.5 Temperatura media efectiva	60
6.6.6 Coeficiente global de transferencia de calor (U_o)	60
6.6.7 Área total de transferencia de calor	60
6.6.8 Número total de tubos.....	61
6.7 EVIDENCIA DE RESULTADOS.....	61
7. RESULTADOS, DISCUSIÓN, ANÁLISIS E IMPACTO EN EL PROCESO.....	62
7.1 DATOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE DE MEPSA.....	62
7.2 VARIABLES QUE GENERAN OXIDACIÓN EN LA PALANQUILLA.....	65
7.3 CONDICIONES CON LAS CUALES DEBE TRABAJAR EL HORNO DE CALENTAMIENTO	67
7.3.1 Cálculo del tiempo de permanencia de la palanquilla dentro del horno	67
7.3.2 Cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión	68
7.3.3 Cálculo de calor necesario para calentar las palanquillas:	70
7.3.4 Cálculo de pérdidas de Calor por paredes y techo en el horno de calentamiento: ..	71
7.3.5 Cálculo del Calor total suministrado al horno para su operación	75
7.3.6 Cantidad de combustible necesario para la operación del horno	75
7.3.7 Volumen de aire que debe ser suministrado	78
7.4 CONDICIONES ACTUALES EN LAS QUE TRABAJA EL HORNO	78
7.5 PERIODOS DE LIMPIEZA DEL HORNO	80
7.6 DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR	81
7.6.1 Calculo de Caudal másico	81

7.6.2 Calculo de delta de temperatura	82
7.6.3 Calculo de promedio de flujo de calor.	82
7.6.4 Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (Log Mean Temperature Difference).....	83
7.6.5 Calculo de temperatura media efectiva	84
7.6.6 Calculo de coeficiente global de transferencia de calor (U_o).....	84
7.6.7 Calculo del área total de transferencia de calor	84
7.6.8 Calculo del número total de tubos.....	85
7.7 EVIDENCIA DE RESULTADOS.....	87
8. CONCLUSIONES	90
9. RECOMENDACIONES TÉCNICAS	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
INFOGRAFÍA.....	94
ANEXO A. Plano de empresa Metales y Procesos del Oriente S.A.	96
ANEXO B. Plano del horno de calentamiento de MEPSA.....	97
ANEXO C. Plano de los quemadores Hauck 780series	98
ANEXO D. Factor de corrección de temperatura para intercambiadores de calor.....	99
ANEXO E. Coeficientes globales de transferencia de calor para intercambiadores de calor	100
ANEXO F. Especificaciones técnicas para tubería de 1" cedula 40	101
ANEXO G. Planos de intercambiador de calor de coraza y tubos.....	102
ANEXO H. Planos de disposición del intercambiador de calor en la chimenea del horno	103

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cizalla de corte de palanquilla.....	21
Figura 2. Entrada de las palanquillas al horno.....	22
Figura 3. Deshornado de la palanquilla	23
Figura 4. Tren de desbaste 450.....	24
Figura 5. Cizalla de corte de cabeza y cola de las barras.....	25
Figura 6. Tren de desbaste continuo.....	26
Figura 7. Tren de desbaste numero 2.....	27
Figura 8. Tren acabador de una sola caja.....	27
Figura 9. Mesa de enfriamiento y acabado del proceso.....	28
Figura 10. Horno de calentamiento de MEPSA.....	30
Figura 11. Quemador Hauck 780 Series para el horno de calentamiento de MEPSA.....	32
Figura 12. Ruptura de una capa liquida en gotas.....	34
Figura 13. Aire saliente del intercambiador de calor.....	84
Figura 14. Disposición del intercambiador de calor en la chimenea.....	85
Figura 15. Diferencia de espesores de calamina antes y después de cambios realizados al proceso.....	88
Figura 16. Esquema de partes del proceso de laminación en caliente de MEPSA.....	94
Figura 17. Plano estructural del horno de calentamiento.....	95

Figura 18. Esquema de los quemadores Hauck 780series.....	96
Figura 19. Planos de intercambiador de calor calculado.....	100
Figura 20. Planos del intercambiador de calor calculado dentro de la chimenea.....	101

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Capacidades del quemador operando con persianas cerradas.....	31
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del fuel oíl N°6 usado por MEPSA.....	35
Tabla 3. Análisis químico del combustible.....	36
Tabla 4. Condiciones fisicoquímicas reales del aire.....	37
Tabla 5. Pesos del proceso de laminación en caliente.....	61
Tabla 6. Generación de óxido de hierro en el proceso de calentamiento.....	63
Tabla 7. Variables que generan oxidación sobre la palanquilla.....	64
Tabla 8. Composición de aceros de bajo carbono.....	66
Tabla 9. Valores de las condiciones actuales de trabajo del horno.....	77
Tabla 10. Nuevas condiciones de trabajo del horno.....	86
Tabla 11. Generación de óxido de hierro posterior a cambios realizados.....	87
Tabla 12. Coeficientes globales de transferencia de calor.....	98
Tabla 13. Especificaciones técnicas para tuberías de acero al carbono.....	99

LISTADO DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Gráfica para hallar factor de corrección de temperatura.....	97

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es diseñar una metodología para lograr reducir y controlar la generación de cascarilla de laminación en el horno de calentamiento de palanquilla de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A, en el cual se puedan encontrar las recomendaciones técnicas del manejo del horno, acciones correctivas inmediatas (cantidades adecuadas de combustible y aire según proveedor de combustible) y periodos de limpieza del horno.

Mediante la aplicación de la recopilación de datos del proceso de laminación en caliente tomando la cantidad de calamina producida en un lapso de tiempo determinado se logra demostrar numéricamente y con resultados medibles las condiciones en las que trabaja el horno de calentamiento y de esta manera determinar las acciones más adecuadas para evitar la excesiva pérdida de materia prima por oxidación y de combustible por cantidades inadecuadas en la combustión, lo cual desencadena altas pérdidas monetarias para la empresa.

Para el desarrollo de la metodología primeramente se recopilaron los datos de generación de cascarilla de laminación durante 4 semanas partiendo de reportes de pesos tomados por los encargados de cada punto del proceso donde es pertinente la toma de este tipo de mediciones. Adicionalmente, comparando con los datos obtenidos de un experimento que consistía en pesar una palanquilla por día antes de ingresar al horno, posteriormente tomar el tiempo de permanencia en el horno y por último la toma de peso de salida de la palanquilla, determinado la diferencia entre el peso inicial y final, como la cantidad de calamina que se generó. Una vez consolidada la información, se identificaron las variables que influyen en la generación de calamina, se comienza con los cálculos de: Condiciones de combustión del horno para alcanzar la temperatura deseada manteniendo al mínimo las pérdidas de materiales, periodos de limpieza del horno, cálculos para intercambiador de calor para el calentamiento del aire. Por último, se realizó la valoración de las condiciones de trabajo del horno y se aplicaron los cambios pertinentes según los cálculos realizados, tomando los nuevos datos obtenidos y comparando el porcentaje de calamina producida antes y después de los cambios, notando una reducción del 30% en la generación de calamina. A partir de la fecha, se realizaron las recomendaciones respectivas a ejecutar para lograr el máximo provecho de materiales con los que cuenta la planta.

Palabras clave: Disminución de Calamina, Combustión, laminación en caliente, oxidación de palanquilla.

INTRODUCCIÓN

El proceso de laminación en caliente es un paso clave para la entrega de productos tales como varillas corrugadas, barras lisas, ángulos, platinas, entre otros, consiste en calentar un material sobre la temperatura de recristalización y hacerlo pasar a través de rodillos que giran y reducen la sección transversal del mismo, en materiales con temperatura de recristalización alta como el caso del acero la superficie del material reacciona con el medio formando una capa de óxido denominada calamina.

Actualmente se sabe que esta oxidación es producida debido a la atmósfera oxidante que se genera por la inyección de aire en exceso para el proceso de combustión, sin contar el aire que entra al horno por las distintas aperturas de este, las cuales no son medibles, además de la composición de la palanquilla de acero que entra a estos hornos, la temperatura hasta la cual se calienta dicho material y de igual manera el tiempo de permanencia dentro del horno para lograr alcanzar la temperatura deseada.

Este trabajo tiene como finalidad diseñar una metodología para disminuir y controlar la generación de cascarilla de laminación en la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. debido a que este problema genera pérdidas económicas a la empresa. La manera más adecuada para disminuir la cantidad de calamina producida es por medio de cálculos del óptimo funcionamiento de los quemadores del horno para determinar las combinaciones adecuadas de combustible-aire para cada tipo de palanquilla que entra al proceso, analizando de igual manera la forma de complementar estos cambios con los recursos disponibles en la empresa, además de dar instrucciones a los operarios del horno del adecuado manejo del mismo teniendo en cuenta los valores hallados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. es una organización que labora con el proceso de laminación en caliente de palanquillas de acero, este proceso requiere una inspección constante para mitigar la generación de cascarilla de laminación que producen pérdidas en peso de materia prima. La problemática se centra en el horno de calentamiento de la palanquilla, pues dentro de este se presenta una excesiva oxidación sobre la palanquilla que al ir disminuyendo su temperatura crea una capa de óxido de hierro que es conocida como cascarilla de laminación o calamina.

La generación de cascarilla en el proceso de laminación en caliente de la empresa MEPSA no presenta hasta la fecha un control para disminuir estas pérdidas, dentro de los problemas que conllevan la ausencia de dicho control están la pérdida en peso de materia prima, uso excesivo de combustible por falta de control en el proceso de combustión de los quemadores del horno y pérdidas económicas, que pueden generar demoras en la entrega de pedidos a los clientes.

2. OBJETIVOS

El objetivo general y los objetivos específicos que persigue la realización de este proyecto de investigación son los siguientes:

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología para disminuir y controlar la oxidación de la palanquilla presentada dentro del horno de calentamiento con el fin de optimizar el proceso de laminación en caliente de la empresa MEPSA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudio para determinar las causas de la excesiva generación de óxido de hierro.
- Llevar un control del porcentaje en peso de cascarilla generado en el proceso.
- Optimizar el proceso de combustión de los quemadores.
- Realizar las recomendaciones técnicas a los operarios del horno para que implementen las acciones correctivas.

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 ALCANCES

El alcance más importante del presente trabajo es la implementación de una metodología que permita reducir y controlar la oxidación de las palanquillas de acero, y de esta manera, lograr una mejora considerable en el proceso de laminación en caliente de la empresa MEPSA. Mediante el control de oxidación se tiene la garantía de disminuir las pérdidas de distintos materiales y los costos de producción.

Las recomendaciones técnicas que se darán al final de trabajo realizado sólo se limitarán al horno de calentamiento de palanquilla de MEPSA con sus respectivos quemadores. Ya que el fenómeno de oxidación de la palanquilla dentro del horno de calentamiento se ve acelerado o retardado por el tipo de combustible y comburente que se use para la combustión, el tipo de palanquilla procesada (composición), temperatura de calentamiento y tiempo de permanencia de la palanquilla en el horno.

3.2 LIMITACIONES

Las limitaciones que se pueden presentar para el completo desarrollo del estudio es la falta de equipos de medición que deben ser comprados.

4. JUSTIFICACIÓN

El horno de calentamiento de la empresa MEPSA, es un instrumento industrial cuyo fin es generar suficiente calor para que la palanquilla de acero alcance una temperatura adecuada para el posterior proceso de laminación en caliente, siendo este quien desempeña la labor más importante en el proceso, dando la suficiente ductilidad a la palanquilla para que pase por los cilindros de laminación sin generar daños físicos a los mismos.

La empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. es una empresa metalúrgica que inició sus actividades el año 1981 como una pequeña organización utilizando como materia prima despuntes y cobles de acero. Actualmente usa palanquilla de acero saliente de máquinas de colada continua, desde entonces y hasta la fecha no cuenta con una metodología para mitigar la generación de cascarilla de laminación y por consiguiente tampoco cuenta con un control en las variables que intervienen directamente en esta problemática.

Realizar un seguimiento al proceso por un periodo de tiempo determinado es la mejor opción para determinar la cantidad de material perdido por oxidación. El siguiente paso es la observación de las condiciones de trabajo del horno de calentamiento, y por último realizar cálculos y cambios pertinentes para que el horno funcione adecuadamente, esperando de este modo una optimización en el proceso de laminación en caliente de la empresa, evitando de este modo paradas no programadas en la producción, disminución en accidentes laborales por intervención directa con la palanquilla que sale del horno. Este es tal vez el alcance más importante en la implementación de el plan de acción mencionado, ayudando a la empresa a mitigar las pérdidas económicas por la problemática existente.

5. MARCO REFERENCIAL

Para el correcto desarrollo de la investigación se procedió a indagar sobre las definiciones e información necesaria sobre el problema planteado.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA METALES Y PROCESOS DEL ORIENTE S.A.

La empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. es una empresa metalúrgica que inició sus actividades el año 1981 como una pequeña organización utilizando como materia prima despuntes y cobles de acero. Actualmente usa palanquilla de acero saliente de máquinas de colada continua para realizar el proceso de laminación en caliente con la finalidad de obtener perfiles livianos de acero al carbono de todos los espesores necesarios para el mercado actual tales como varillas corrugadas, barras lisas, ángulos, platinas y cuadrados.¹

5.2 PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE

El proceso de laminado en caliente es aquel que se realiza por encima de la temperatura de recrystalización del material. La temperatura de recrystalización es la temperatura a la cual los granos de la microestructura comienzan a transformarse en nuevos granos sin dislocaciones. Por lo anterior, cualquier dislocación generada durante el proceso de compresión bajo los rodillos es eliminada debido a la temperatura de los rodillos que transfieren suficiente calor a las láminas elevando su temperatura por encima de la de recrystalización. El resultado son granos dúctiles que pueden ser laminados idealmente cualquier número de veces. El proceso de laminado en caliente se utiliza para romper estructuras de colada, o fundición comúnmente dendrítica, la cual incluye granos grandes y no uniformes².

El proceso de laminado en caliente se lleva a cabo comúnmente para aceros aleados. Se manejan temperaturas entre 0.8 y 0.9 veces la temperatura de fusión para el caso del acero, lo que corresponde a la temperatura de recrystalización encontrándose esta entre 1100°C a 1250°C. Generalmente el laminado en caliente se utiliza para deformar volúmenes grandes de material, y su intención es transformar dichos volúmenes en preformas que luego puedan ser procesadas de otro modo (por ejemplo, laminado en frío). Los primeros productos de laminado en caliente son la palanquilla y el planchón.

¹ [On line] Disponible en: <http://www.mepsa.com.co/historia.html>

² ASKELAND, Donal R., Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México, 1998. Pág.366

Durante el proceso de laminado en caliente generalmente se encuentran desperfectos en la superficie y un acabado de mala calidad; en materiales cuya temperatura de recrystalización corresponde a temperaturas elevadas como el acero, la superficie laminada reacciona con el medio (aire) y forma una capa llamada calamina, este óxido debe ser removido en la mayoría de los casos por medios mecánicos o por ataque químicos.³

Según los productos que sean objetivo obtener se carga el horno de calentamiento con palanquillas de distintas medidas previamente calculadas para evitar la mayor pérdida de material posible.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LAMINADO EN LA EMPRESA METALES Y PROCESOS DEL ORIENTE S.A.

Las palanquillas llegan a la empresa de distintos proveedores y estas se trasladan hasta una cizalla de corte que da las medidas adecuadas a la palanquilla según la capacidad del horno y los cálculos realizados con anterioridad para evitar productos con longitud inferior a la requerida para la comercialización.

Figura 1. Cizalla de corte de palanquilla



Fuente. Autor

³ GROOVER, Mikell P., "Fundamentos de manufactura moderna", McGraw Hill, 3ra edición, México, 2007. Pág.395.

Desde la cizallase trasladan las palanquillas cortadas hasta la puerta del horno de calentamiento por medio de un puente grúa. Un sistema de pistones hidráulicos que mueven un tornillo sin fin introduce las palanquillas al interior del horno, depositándolas sobre el suelo del mismo.

Figura 2. Entrada de las palanquillas al horno



Fuente. Autor

Al ser cargadas comienza su calentamiento, atravesando la longitud del horno, mediante el empuje que ejerce el tornillo sin fin. Cuando llegan al otro extremo, han alcanzado ya la temperatura necesaria para ser laminadas y son despedidas hacia el tren laminador (etapa posterior al calentamiento) por una serie de rodillos refrigerados por agua, a través de una puerta lateral del tipo guillotina, llamada puerta de deshormamiento.

Figura 3. Deshornado de la palanquilla



Fuente. Autor

Una vez salen las palanquillas del horno se transportan por el camino de rodillos refrigerados hasta el primer pase del tren de desbaste también llamado tren 450, desde ahí realizan 9 pases más en aproximadamente 90 segundos según la longitud inicial de la palanquilla.

Figura 4. Tren de desbaste 450



Fuente. Autor

A continuación, las palanquillas pasan a una cizalla que le quita 20cm en cada extremo de la barra que sale del tren de desbaste con el fin de eliminar imperfecciones que puedan quedar en la barra.

Figura 5. Cizalla de corte de cabeza y cola de las barras



Fuente. Autor

Cuando se cortan las esquinas de las barras, pasan a un tren de desbaste continuo integrado por tres cajas de distinta forma que van disminuyendo el diámetro de la barra según sea necesario para cada producto.

Figura 6. Tren de desbaste continuo



Fuente. Autor

A continuación, pasan a un tren de desbaste número 2 que de igual manera se compone de tres cajas con distintas formas donde cada vez que hace un pase que reduce la sección transversal de la barra, para de esta forma lograr el menor esfuerzo posible para dar la forma final del producto.

Figura 7. Tren de desbaste numero 2



Fuente. Autor

Con el fin de dar la forma final a los productos, las barras pasan por un tren acabador integrado de una sola caja.

Figura 8. Tren acabador de una sola caja



Fuente. Autor

Por último, se transporta a una mesa de enfriamiento de 24 metros de longitud, donde al disminuir su temperatura pasan a una cizalla donde se cortan los productos a las medidas necesarias para el mercado actual, luego se almacenan y se venden.

Figura 9. Mesa de enfriamiento y acabado del proceso



Fuente. Autor

En el anexo A se puede encontrar un esquema que contiene todas las partes del proceso de laminación en caliente de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A.

5.4 HORNO DE CALENTAMIENTO DE MEPSA

El horno de calentamiento sirve para calentar las palanquillas antes del proceso de laminación, está constituido por quemadores alimentados habitualmente de gas o fuel oil, usualmente son de vigas galopantes accionados por un sistema hidráulico, son hornos de paso continuo indicados para el precalentamiento de palanquillas a altas temperaturas. El movimiento alternativo de elevación, avance, descenso y retorno de vigas de material refractario dispuestas en ranuras de la solera del horno hace avanzar las cargas a lo largo de su interior. Existen distintos dispositivos de entrada y salida de las piezas en el horno para integración en las líneas de producción. El tiempo de permanencia de las piezas en el interior de la cámara se regula en función de la frecuencia de accionamiento de las vigas. El horno puede vaciarse a voluntad.

El horno del calentamiento de tipo empuje directo tiene una longitud total de 16,5 m, un ancho de 2,37 m y una altura de 2,585m. Este provee al proceso palanquillas a una temperatura de 1250 °C (aptas para laminación). El calentamiento se efectúa por medio de dos quemadores radiantes marca Hauck 780 Series instalados en la bóveda del horno, al extremo contrario de la puerta de entrada de las palanquillas y con un combustóleo N°6 con composición y poder calorífica conocida y mostrada más adelante. Desde el punto de vista térmico, el horno está dividido en tres zonas, cada zona se distingue por la temperatura que logra alcanzar; En la primera zona (zona de humos o precalentamiento) se logra obtener una temperatura aproximada de 800°C, en la segunda zona se alcanza la mayor temperatura (1275°C) a esta se le conoce como zona de calentamiento y por ultimo esta la zona de igualación donde las palanquillas alcanzan la temperatura deseada de 1250°C aproximadamente, la cual es como se ha mencionado anteriormente una temperatura adecuada para el proceso de laminación.

Los planos con las medidas exactas del horno de calentamiento se pueden encontrar en el Anexo B, donde se evidencian medidas exactas de cada parte del horno.

Figura 10. Horno de calentamiento de MEPSA



Fuente. Autor

5.5 QUEMADORES HAUCK 780 SERIES

Los quemadores que usa el horno de calentamiento de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. son de marca Hauck 780 Series, los cuales tienen las siguientes características:

- Quema todos los grados de fueloil
- Altamente confiable y eficiente usando baja presión de aire de atomización
- Proporciones exactas de aceite y aire
- Control de palanca única.
- Instalación y operación simplificadas
- Válvula de control de flujo de aceite integrada

Los quemadores de la serie 780 son auto proporcionados, son quemadores de aceite diseñados para una alta eficiencia de operación usando baja presión de aire atomizado. Esto resulta en bajos costos de operación debido al consumo de energía que se reduce por un soplador de baja presión en comparación con un compresor

de aire. Este tipo de quemador también elimina la necesidad de costos en cuanto a vapor de alta presión para atomización y la necesidad de un soplador de aire atomizador. El quemador operará con presiones de aire que van desde 16 a 32 osig (6,900 a 13.800 Pa).

Este tipo de quemadores puede usar combustibles fuel oíl desde el N°2 hasta el N°6 con capacidades que van desde 200,000 a 14,000,000 Btu / h (59 a 4,100 kW). Para capacidades más altas se requieren quemadores con aire inducido. Todos los grados de combustóleo, incluso el más pesado, son completamente atomizados para proporcionar la más eficiente combustión, la atomización excelente es lograda controlando el flujo de aire en la salida de la boquilla, Los aceites pesados y regenerados deben ser calentado a una viscosidad de 90 SSU ($1.8 \times 10^{-5} \text{m}^2.\text{seg}$). La temperatura del aceite debe mantenerse constante para evitar variación en las tasas de encendido de los quemadores. Este tipo de quemadores tiene una alta aplicabilidad, en especial para muchos tipos de hornos y secadores. A continuación, se presenta una tabla con las capacidades del quemador:

Tabla 1. Capacidades del quemador operando con persianas cerradas

Burner Size	779	780	781	782	783	784	785	786
Air Inlet	1"	1 1/2 "	2"	3"	4"	6"	6"	8"
Oil Inlet Size	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	1/2"	1/2"	1/2"
16 osi Air Pressure								
Air Max. (CFM)	34	66	123	210	298	660	910	1620
Oil Max. (GPH)	1.5	2.9	5.4	9.2	13	29	40	71
Oil Min. (GPH)	0.75	1	1.1	1.1	3.1	6.2	11.1	16.7
20 osi Air Pressure								
Air Max. (CFM)	38	74	138	235	334	739	1019	1814
Oil Max. (GPH)	1.7	3.3	6	10.3	14.7	32.5	44.8	79.7
Oil Min. (GPH)	0.75	1	1.2	1.3	3.5	6.9	12.4	18.7
24 osi Air Pressure								
Air Max. (CFM)	42	81	151	257	365	809	1115	1985
Oil Max. (GPH)	1.8	3.6	6.6	11.3	16	35.6	49	87.3
Oil Min. (GPH)	0.75	1	1.3	1.4	3.9	7.6	13.6	20.5
32 osi Air Pressure								
Air Max. (CFM)	48	93	173	296	420	931	1283	2284
Oil Max. (GPH)	2.1	4.1	7.6	13	18.5	40.9	56.4	100.4
Oil Min. (GPH)	0.75	1.1	1.5	1.6	4.4	8.7	15.6	23.6

Fuente. <http://www.morterahauck.com/fichas/quemadores/780.pdf>, página 3

La presión de aire de atomización requerida en el quemador para la mayoría de las aplicaciones es de 16 osi para los aceites destilados ligeros y de 24 a 32 osi para aceites residuales pesados el cual es el caso de la empresa MEPSA la cual cuenta con ventiladores de presión constante para el suministro de aire a 24 osi. Según

recomendaciones de la empresa Hauck la tubería de suministro de aire ingresa desde arriba del quemador (12 en punto).

Se debe suministrar aceite al regulador de presión de aceite del quemador a 25 psig o más para los aceites livianos que no requieren calentamiento, y a 35 psig o más para aceites residuales pesados calentados. El regulador de presión de aceite reduce y mantiene la presión de aceite constante a la presión de operación requerida, generalmente de 2 a 10 psig en el quemador.⁴

El quemador se muestra a continuación:

Figura 11. Quemador Hauck 780 Series para el horno de calentamiento de MEPSA



Fuente. Autor

Los planos con las medidas exactas de los Quemadores usados por el horno de calentamiento se pueden encontrar en el Anexo C.

⁴ [On line] Disponible en: <http://www.morterahauck.com/fichas/quemadores/780.pdf>

5.6 PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

El combustible líquido habitualmente se quema a través de una suspensión de gotas generadas como consecuencia de su atomización (véase figura 12). Las gotas provienen del atomizador y se dirigen hacia la zona de combustión, y en el pasaje se calientan como consecuencia de la radiación de la llama y de la transferencia de calor convectiva desde los gases calientes que la rodean. Ello produce la vaporización de los componentes más livianos del combustible, que se mezclan con el aire que rodea la gota y luego combustionan.

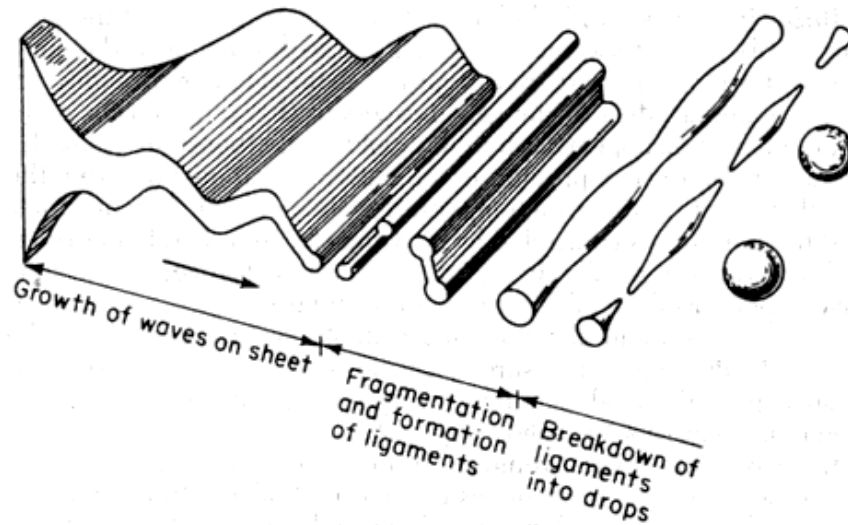
Según el tipo de combustible, la gota puede ser completamente vaporizada, o parcialmente vaporizada dejando depósitos carbonosos residuales o partículas de coque. El fuel oil pueden contener una cantidad significativa de azufre. El SO_2 es el principal producto de la combustión del azufre con mezclas aire-combustible estequiométricas o más pobres; pero con el exceso de aire normalmente utilizado para la combustión satisfactoria puede formar SO_3 y condensar como ácido sulfúrico a temperaturas más altas que las temperaturas de rocío normalmente esperadas. En este caso, pueden ser puestos en peligro los precalentadores de aire y otros equipos de recuperación de calor.

Los quemadores atomizan el combustible a fin de ofrecer la mayor superficie de contacto con el aire de combustión, que a la vez dispersa las partículas convenientemente dentro del hogar, para formar una mezcla aire-combustible de rápida ignición. Los procedimientos más difundidos son la atomización mecánica, con vapor o con aire. Para que la atomización sea la correcta, se debe reducir la viscosidad a valores convenientes, para lo que resulta necesario el calentamiento previo del combustible. Sin embargo, si se superan las temperaturas máximas admisibles, se corre el riesgo de formación de gases que interrumpan el bombeo de combustible y en consecuencia se produzcan fallas en la ignición. También es importante que el combustible no contenga ácidos, arenilla, u otras materias extrañas que puedan taponar o dañar los orificios de los quemadores y sus válvulas de control.

Para altas cargas, la distribución de combustible habitualmente trabaja en forma correcta, no así la del aire. Ello obliga a trabajar con cierto exceso de aire para asegurar una combustión completa en todos los quemadores. En la mayoría de las calderas es posible operar con 5 a 7 % de exceso de aire en la salida del hogar. Si se pone especial atención en el diseño y la operación, las unidades de gran tamaño pueden reducir el exceso de aire al 2,5 %, sin que resulten excesivos los combustibles no quemados. Para compensar el deterioro de la combustión provocado por la baja turbulencia durante el funcionamiento con cargas parciales,

es necesario incrementar el exceso de aire, en especial cuando todos los quemadores se encuentran en servicio⁵.

Figura 12. Ruptura de una capa liquida en gotas



Fuente. BRIZUELA, Eduardo. Combustión de combustibles líquidos, Combustión, unidad XII, Buenos Aires, Argentina: s.n., 2003, pág. 207.

Debido a la cantidad relativamente grande de hidrógeno contenida en el petróleo crudo y otros combustibles del tipo de hidrocarburos y la complejidad de las combinaciones químicas de carbono, hidrogeno y oxígeno en estos combustibles, el poder calorífico de los fuel oils de distintos tipos varían de forma proporcional a sus gravedades específicas, por tal razón los aceites más ligeros tienen poderes caloríficos más altos; el poder calorífico superior de los fuel oil esta generalmente entre 10000 Kcal/Kg a 11000 Kcal/Kg o 18000 BTU/lb a 19500 BTU/ lb⁶.

5.7 COMBUSTIBLE FUEL OÍL N°6 USADO POR MEPSA

Este combustible, es una mezcla de hidrocarburos, con un alto poder calorífico, el cual es sometido a procesos de limpieza, decantación, filtración y deshidratación, quedando homogenizado y libre de residuos sólidos; luego es incorporado en la

⁵ BRIZUELA, Eduardo. Combustión de combustibles líquidos, Combustión, unidad XII, Buenos Aires, Argentina: s.n., 2003, pág. 207.

⁶ BUTTS, Allison. Combustión, Metallurgical Problems, Chapter III, second edición, New York, USA: s.n., 1943, pág. 28

cadena energética de los combustibles industriales como mezclas, y se usa en hornos para procesos de fundición, calentamiento, calderas y quemadores.

Este combustible por descomposición térmica puede producir ácido sulfúrico (H_2SO_4) en pequeñas cantidades, óxidos de carbono (CO , CO_2), hidrocarburos reactivos y óxidos de azufre (SO_x), este combustible es almacenado en recipientes de 6000 galones de capacidad, en una zona seca y con buena ventilación, lejos del horno de calentamiento, este tipo de combustible presenta las siguientes propiedades:

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del fuel oíl N°6 usado por MEPSA

Característica	Resultado
Contenido de agua %Vol.	1,0%
Contenido de azufre %Peso.	1,75%
Kilogramos/galón	3,30500
Gravedad °API (°API)	22
Calor de Combustión bruto BTU/lb	18410
Contenido de cenizas %peso	0,085
Viscosidad a 100°C mm²/seg	<21
Viscosidad a 50°C mm²/seg	150
Punto de inflamación (°C)	144°C

Fuente. Petroservicios Casanare S.A.S, ficha técnica combustible fuel oíl N°6 para hornos y quemadores, pagina 4.

El combustible tiene un color negro, es un combustible ecológico que cumple con todos los requisitos para la preservación del medio ambiente que se expresan en la resolución 909 del 5 de junio del año 2008.

Según el análisis químico presentado por la empresa proveedora el combustible está compuesto por los siguientes elementos en porcentaje en peso de cada uno de ellos:

Tabla 3. Análisis químico del combustible

Elemento	% Peso
C	85,01
H	11,46
S	1,75
N	0,7
H₂O	1
Cenizas	0,085
Total	100%

Fuente. Petroservicios Casanare S.A.S, ficha técnica combustible fuel oil N°6 para hornos y quemadores, pagina 3.

Adicional a esto las cenizas del combustible contienen 14,9% en peso de Carbono que no se quemó.⁷

5.8 AIRE DE COMBUSTIÓN QUE ENTRA A LOS QUEMADORES

El aire que entra para el proceso de combustión es tomado del medio ambiente por dos ventiladores (uno para aire caliente, otro para aire frio) cuya capacidad máxima es de 1834,93 m³/h cada uno, a una presión constante de 24 OSI, el aire que absorbe y empuja cada ventilador a través de ductos tiene las características mostradas en la tabla 4

El aire tiene una presión de saturación de vapor de agua para una temperatura de 20°C equivalente a 17,5mmHg⁸

⁷ Petroservicios Casanare S.A.S, ficha técnica combustible fuel oil N°6 para hornos y quemadores.

⁸ BUTTS, Allison. Tables, Metallurgical Problems, Anexos, second edición, New York, USA: s.n., 1943, pág. 401

Tabla 4. Condiciones fisicoquímicas reales del aire

Característica	Valor
Temperatura del aire (°C)	20
Presión atmosférica (mmHg)	659,6
Humedad relativa (%)	83

Fuente. [On line] Disponible en: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/paipa/tiempo-146665/>

5.9 CASCARILLA DE LAMINACIÓN

La cascarilla de laminación se forma en la superficie del acero cuando el oxígeno reacciona con metal muy caliente y se genera óxido de hierro. Este proceso ocurre inmediatamente después de la colada y también durante el recocido y la laminación en caliente. El tamaño de la cascarilla puede variar desde micrones hasta centímetros y ha de ser eliminado ya que de lo contrario podría dañar la superficie de acabado del acero durante operaciones posteriores de laminación. Para eliminar la cascarilla se utilizan chorros de agua a alta presión; en los trenes de laminación en caliente esta operación se realiza cuando el acero pasa por la mesa de salida desde el tren desbastador. Algunas fábricas, en especial las de chapa gruesa, también ofrecen a sus clientes la opción de eliminar la cascarilla de laminación mediante chorro de granalla. En las acerías integrales la cascarilla con alto contenido de hierro puede ser reciclada devolviéndola a la planta de sinterización. Sin embargo, la contaminación de la cascarilla con aceites y fluidos hidráulicos durante la recogida puede restringir las posibilidades de reciclaje por razones técnicas y medioambientales⁹.

⁹ GLOSARIOS.SERVIDOR-ALICANTE. [En línea] 22 de 03 de 2017. [Citado el: 27 de 04 de 2018.] <https://glosarios.servidor-alicante.com/acero/cascarilla-de-laminacion>.

5.10 FORMACIÓN DE CASCARILLA DE LAMINACIÓN

El óxido de hierro cambia a temperaturas elevadas, entre 700°C a 1300 °C el óxido predominante es la wustita (FeO) con alrededor de 95%, un 4% de magnetita Fe_3O_4 y sólo un 1% de hematita Fe_2O_3 , la hematita representa del 1 al 2%, la magnetita entre 4 y 5% y el resto lo compone la wustita (FeO), esta última es la fase más interna del óxido, se forma cerca de la superficie del metal y por lo tanto, es la más rica en hierro, presenta una estructura cúbica centrada en las caras, la densidad de la wustita puede variar desde 5.54 a 5.9 g/cm³, contiene de 23 a 25% en peso de oxígeno en su estructura y crece enteramente por difusión de los iones de hierro, mientras que los de oxígeno se agregan a la cara externa de la fase y permanecen prácticamente fijos. La magnetita, es una fase intermedia del óxido y es el principal constituyente a 500 °C, su estructura cristalina es una cúbica inversa del tipo espinel, tiene una densidad de 5 a 5.4 g/cm³, contiene un 28% en peso de oxígeno existiendo como un óxido deficiente metálico, aunque en un menor nivel al de la wustita. Finalmente, la hematita, que es la capa más externa del óxido tiene el más alto contenido de oxígeno con alrededor de 30% en peso.

El mecanismo de difusión de la hematita es por migración de los iones de oxígeno, difusión en la cual prácticamente el ion hierro no participa, estos se agregan a la cara interna y permanecen fijos. A la hematita se le ha encontrado en todo tipo de aceros, incluso a bajas temperaturas, su presencia se debe a la remoción incompleta de la wustita durante el laminado. en donde las partículas de wustita al ser laminadas y romperse incrementan considerablemente su cantidad, separándose de la matriz del metal y exponiéndose al aire.¹⁰

5.11 VARIABLES DEL PROCESO QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE CALAMINA EN LOS HORNOS DE CALENTAMIENTO

La formación del óxido ocurre en todas las etapas del proceso de la laminación, desde el colado hasta el enrollado y aún durante el enfriamiento de éste en las mesas de enfriamiento o en bodega. Las zonas de mayor generación del óxido corresponden a la zona de colada y horno túnel y representan en su conjunto casi el total del óxido que se forma en una planta de laminación en caliente.

De las variables que más influencia tienen en la generación del óxido en el proceso de laminación en caliente en las palanquillas de acero son sin duda la temperatura,

¹⁰ RAMIREZ, Jorge. Cinética de crecimiento, mecanismos de remoción y morfología del óxido de hierro en aceros laminados en una planta compacta de productos planos. Tesis de Doctorado en ingeniería de materiales. Universidad autónoma de nuevo león. 2005. Pag 11.

el tiempo del planchón dentro del horno túnel y la atmosfera que se forma dentro del horno que estará dada por la relación entre aire y combustible que entra. A mayor temperatura y tiempo la cinética de crecimiento del óxido aumenta y a mayor cantidad de oxígeno libre dentro del horno se ve favorecido el crecimiento de óxido, además de la composición química de la palanquilla que es procesada interviene con una menor afectación que las variables anteriormente mencionadas.¹¹

La variable temperatura actúa de la siguiente manera, al estar expuesto el metal a un gas oxidante, se forma una pequeña capa de óxido sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas. Esta capa permite que se produzca la oxidación de la pieza metálica mediante el movimiento iónico a través de su superficie. La rapidez a la que tiene lugar la oxidación de un determinado metal no es constante, esta depende, entre otros factores, de la temperatura y la presión del oxígeno en la atmósfera oxidante. La oxidación se produce más rápidamente, ya que la difusión de los iones metálicos y de oxígeno se ve favorecida a temperaturas elevadas. Y mientras mayor sea la presión del oxígeno, mayor será la velocidad a la que se lleva a cabo la oxidación, puesto que en este caso la difusión de los iones O^{2-} se realiza con mayor facilidad.¹²

El tiempo de permanencia de la palanquilla de acero en el horno de calentamiento es de vital importancia en el estudio de la generación de cascarilla de laminación u óxido de hierro sobre la palanquilla de acero, puesto que cuanto más tarde una palanquilla dentro del horno en contacto con la atmosfera oxidante del mismo, mayor será el espesor de la capa de óxido que se genera en la superficie de la palanquilla. La generación de óxido crece exponencialmente a medida que aumenta el tiempo de permanencia y la temperatura de calentamiento.

La relación que teóricamente se requiere para la combustión que generara la energía adecuada para el calentamiento de las palanquillas dará la atmosfera que se generara en el laboratorio del horno, una atmosfera neutra es lo más recomendable pero la más difícil de conseguir por la cantidad de aire que ingresan al horno por las aperturas de cargue y descargue, que no son medibles. Las atmosferas oxidantes se presentan cuando se inyecta aire en exceso quedando oxígeno libre para reaccionar con los átomos de hierro formando los óxidos presentes en la calamina. Por otro lado, la atmosfera reductora se presenta cuando

¹¹ RAMIREZ, Jorge. Cinética de crecimiento, mecanismos de remoción y morfología del óxido de hierro en aceros laminados en una planta compacta de productos planos. Tesis de Doctorado en ingeniería de materiales. Universidad autónoma de nuevo león. 2005. Pag 168.

¹² MONTES, Maria. estudio teórico termodinámico y cinético de la oxidación a altas temperaturas de aleaciones binarias. Tesis profesional en ingeniería química industrial. Instituto Técnico nacional. Pag 20.

hay ausencia de oxígeno para la combustión, quedando residuos del combustible sin quemar.

5.12 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La ciencia de la transferencia de calor se ocupa del análisis de la tasa de transferencia de calor que ocurre en un sistema. La energía transferida por flujo de calor no puede medirse directamente, pero se relaciona con la cantidad física conocida como temperatura; cuando en un sistema hay una diferencia de temperatura, el calor fluye de la región de mayor a la de menor temperatura. En el estudio de la transferencia de calor es esencial conocer la distribución de temperatura en un sistema, ya que siempre hay flujo de calor cuando existe un gradiente de temperatura. Una vez que se conoce la distribución de temperatura, se determina rápidamente por la ley que relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura, una cantidad de interés práctico, el flujo de calor, que es la cantidad de calor transferido por unidad de área.

En el estudio de la transferencia de calor se suelen considerar tres mecanismos distintos de transferencia: conducción, convección y radiación. En realidad, la distribución de temperatura en un medio se controla por los efectos combinados de estas tres formas de transferencia de calor; por tanto, no es realmente posible aislar por completo una forma de las interacciones de las otras dos. Sin embargo, para simplificar el análisis de un sistema se puede considerar un solo mecanismo cuando los otros dos son despreciables.

5.12.1 Conducción

La conducción es la forma de transferencia de calor en la cual el intercambio de energía ocurre de la región de mayor a la de menor temperatura por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones, como en el caso de los metales, el valor de transferencia de calor por conducción está relacionado con la conductividad térmica de los materiales, la cual varía también con la temperatura, la de la mayoría de los metales puros disminuye con la temperatura, mientras que la de los gases y de los materiales aislantes aumenta con ella.

5.12.2 Convección

Cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes, habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie, a este mecanismo de transferencia de calor se da el nombre de convección. Se dice que la transferencia de calor es por convección

forzada si el movimiento es inducido artificialmente, ya sea por una bomba o un ventilador que impulse el fluido sobre la superficie. Se dice que la transferencia de calor es por convección libre, si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperatura en el fluido.

5.12.3 Radiación

Cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto, no es posible la transferencia de calor entre ellos por conducción o convección; en tal caso, la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica. Es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo, debida a su temperatura, es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas de acuerdo con la teoría clásica de las ondas electromagnéticas de Maxwell o en forma de fotones discretos, de acuerdo con la hipótesis de Planck. Ambos conceptos han sido utilizados en la investigación de la transferencia de calor por radiación. La emisión o absorción de energía radiante por un cuerpo, es un proceso global, es decir, la radiación que se genera en el interior del cuerpo se emite a través de la superficie; recíprocamente, la radiación que incide sobre la superficie de un cuerpo penetra en el medio, en donde es atenuada¹³.

5.13 INTERCAMBIADORES DE CALOR

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.

¹³ OZISIK, Necati M. Transferencia de calor. McGraw Hill, Universidad del estado de carolina del norte, U.S.A. Pág. 1-6.

- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

La función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan.

5.13.1 Tipos de intercambiadores de calor según se construcción

Los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos siguientes categorías: carcasa y tubo o plato. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación.

5.13.1.1 Carcasa y tubo

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcasa o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por las placas del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido con una presión más baja se circula del lado de la carcasa. Esto es debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la cáscara del cambiador con un costo mucho más bajo.

5.13.1.2 Plato

El intercambiador de calor de tipo plato consiste de placas en lugar de tubos para separar a los dos fluidos caliente y frío. Los líquidos calientes y fríos se alternan entre cada uno de las placas y los baffles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, las placas proveen un área extremadamente grande de transferencia térmica a cada uno de los líquidos. Por lo tanto, un intercambiador de placa es capaz de transferir mucho más calor con respecto a un intercambiador de carcasa y tubos con volumen semejante, esto es debido a que las placas proporcionan una mayor área que la de los tubos. El intercambiador de calor de plato, debido a la alta eficacia en la transferencia de calor, es mucho más pequeño que el de carcasa y tubos para la misma capacidad de intercambio de calor. Sin embargo, el tipo de intercambiadores

de placa no se utiliza extensamente debido a la inhabilidad de sellar confiablemente las juntas entre cada una de las placas. Debido a este problema, el tipo intercambiador de la placa se ha utilizado solamente para aplicaciones donde la presión es pequeña o no muy alta, por ejemplo, en los refrigeradores de aceite para máquinas.

5.13.2 Tipos de intercambiadores de calor según su operación

Los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: Flujo paralelo, Contraflujo y Flujo cruzado.

5.13.2.1 Flujo Paralelo

Existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproxima la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos.

5.13.2.2 Flujo Cruzado

En el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador bifásico. Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y éste se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utilizar este tipo de intercambiador de calor.

5.13.2.3 Intercambiadores de un solo paso (o paso simple) y de múltiples pasos

Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro de un intercambiador de paso simple. Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos. Si el fluido sólo intercambia calor en una sola

vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso. Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos al utilizar dobleces en forma de "U" en los extremos, es decir, el doblez en forma de "U" permite al fluido fluir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador. Un segundo método para llevar a cabo múltiples pasos es insertar baffles o platos dentro del intercambiador.¹⁴

¹⁴ JARAMILLO. O.A. Intercambiadores de calor. Centro de investigación en energía. Universidad nacional autónoma de México. 2007. Pág. 2-8.

6. METODOLOGÍA

Las fórmulas y procedimientos para calcular cada uno de los parámetros requeridos por la metodología propuesta, se basan en la teoría de la estequiometría, combustión y termodinámica.

6.1 RECOPIACIÓN DE DATOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE DE MEPSA

La metodología propuesta parte inicialmente de la recopilación de datos del proceso donde se mide la cantidad de material oxidado en un lapso de tiempo determinado.

Por un lado, se toma una tabla de datos donde se tiene en cuenta el producto a producir, la cantidad en peso de la palanquilla que entra al horno para ser procesada, la cantidad de combustible inyectada en el día para el calentamiento de la palanquilla, el peso total de productos terminados, la cantidad de combustible usada por tonelada procesada, el material perdido por cortes a las barras y despuntes de longitud menor a la requerida y por último la cascarilla en base húmeda. Para hallar el contenido de humedad se debe tener en cuenta que la producción diaria de cascarilla es aproximadamente 2000 kg, de las cuales se tomaron 3 muestras diarias representativas de 1200 gr cada una durante 4 semanas, las cuales fueron pesadas antes y después de ser secadas, obteniendo de esta manera un contenido de humedad muy aproximado al real. Para determinar el peso de las muestras representativas se usó la siguiente ecuación de muestreo estadístico:

$$n = \frac{Z^2(P*Q)}{e^2 + \left(\frac{Z^2(P*Q)}{N}\right)} \quad ^{15} (1)$$

donde:

n: tamaño de muestra.

Z: nivel de confianza deseado (99% = 2,58)

P: proporción de la población con la característica deseada (0,5)

¹⁵ WALPOLE, Ronald. Probabilidad y estadística para ingenieros. Sexta edición. Pág. 204.

Q: proporción de la población sin la característica deseada (1-P)

e: Nivel de error dispuesto a cometer (2,5%)

N: tamaño de la población (2000)

Por otra parte se lleva una tabla de datos que contiene datos para determinar el contenido diario que se produce de óxido de hierro dentro del horno de calentamiento cuyos datos se basa en un experimento realizado que consiste en introducir una palanquilla identificada al horno con un peso conocido, tomando el tiempo que permanece está dentro del horno, una vez sale, se retira para que no sea laminada, se deja enfriar, se descascara y se pesa nuevamente, teniendo así una diferencia de peso inicial y final que consiste en la cantidad de oxido producido, de esta manera se puede tener un dato exacto del porcentaje de cascarilla de laminación producida a diario en la empresa.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES QUE GENERAN OXIDACIÓN EN LA PALANQUILLA

La identificación de las variables que afectan directamente en la problemática de generación de óxido de hierro en la superficie de las palanquillas en su calentamiento en el horno para el proceso de laminación en caliente de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A., se realizó con ayuda de la recopilación de datos propuesta anteriormente, donde se evidencian diferentes tiempos de permanencia para las palanquillas dentro del horno de calentamiento, con ayuda de las fichas técnicas del acero del cual está compuesta la palanquilla que llega a la empresa como materia prima, valores de temperatura del horno tomados con un pirómetro óptico al momento del deshornado de las palanquillas, y teniendo en cuenta la cantidad de combustible que se inyecta a diario para el proceso de combustión de los quemadores. Estos datos se comparan con los obtenidos de generación de óxido de hierro diario, para así lograr afirmar que existen cuatro variables que intervienen directamente en la generación de óxido de hierro dentro del horno de calentamiento y que se evidencian en la tabla 7, las cuales son:

- Material de palanquilla.
- Temperatura de calentamiento.
- Tiempo de permanencia.
- Proceso de combustión.

6.3 CONDICIONES CON LAS CUALES DEBE TRABAJAR EL HORNO DE CALENTAMIENTO

6.3.1 Tiempo de permanencia de la palanquilla en el horno

Este cálculo es muy importante para evitar el exceso de calentamiento de las palanquillas, mitigar la oxidación de las palanquillas y aumentar la producción de la empresa. Con el fin de conocer este tiempo es necesario tener en cuenta el tiempo que tarda cada palanquilla en el tren de desbaste 450, pues este será quien dé el tiempo del requisito de producción de la empresa donde se tienen en cuenta los tiempos muertos y las diferentes longitudes que pueden tener las palanquillas según sea el producto final que se quiere obtener, con base en lo anterior, es necesario tener los siguientes datos extraídos del anexo B:

- Requisito de producción: una palanquilla cada 90 seg.
- Dimensiones máximas de la palanquilla: 130mm x 130mm x 1500mm
- Longitud útil del horno: 14030mm

Según los datos presentados, aproximadamente cada 90 segundos se requiere procesar una palanquilla en el tren de desbaste 450, y cada palanquilla tiene 130mm de ancho. Usando una regla de tres simple se puede saber el tiempo mínimo que durará una palanquilla en atravesar la longitud útil del horno, para un dato más real teniendo en cuenta las paradas no programadas de proceso y demoras por descansos de los operarios se tendrá un 20% de exceso de tiempo para asegurar el óptimo calentamiento de las palanquillas.

6.3.2 Volumen de aire necesario para la combustión

Para el cálculo del volumen de aire necesario para el proceso de combustión es necesario tener en cuenta las reacciones de oxidación de algunos elementos combustibles de los cuales está compuesto el fuel oil N°6 tales como el Carbono, azufre e hidrogeno, cuyos valores se pueden encontrar en la tabla 3. A partir de estos valores se puede deducir la cantidad de oxígeno que requiere cada elemento para reaccionar y liberar calor tomando como base de cálculo un kilogramo de combustible. Se debe tener en cuenta que hay una parte de carbono que no se quema en las cenizas que contiene el combustible, y a la vez es necesario conocer que el aire está compuesto por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, se tendrá en cuenta un exceso de 10% en la entrada de aire para asegurar que todos los productos de combustión reaccionen por completo.

Para el cálculo real de volumen de aire se debe recurrir a la ley de los gases combinados que establece que:

$$P_1 V_1 T_2 = P_2 V_2 T_1 \quad (2)$$

Donde:

P_1 : presión atmosférica estándar (760mmHg)

V_1 : volumen teórico de aire usado (m^3)

T_1 : Temperatura a condiciones estándar de un gas (273K)

P_2 : presión atmosférica real (mmHg)

V_2 : volumen real de aire usado húmedo(m^3)

T_2 : Temperatura a condiciones reales del aire (293K)

Esta ecuación se usa cuando estos valores son medidos en dos instantes distintos para un mismo sistema. Las condiciones reales del aire que se inyecta a los quemadores se evidencian en la tabla 4.

6.3.3 Calor necesario para el calentamiento de las palanquillas

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Material:** Acero AISI 1015
- **Peso máximo de palanquilla:** 198Kg
- **Capacidad del horno:** 104 palanquillas
- **Calor específico del acero:** 0,11 Kcal/ Kg. °C
- **Temperatura inicial:** 15°C
- **Temperatura final:** 1250°C

Asumiendo un C_p constante, el calor sensible de las palanquillas se evalúa en función de la siguiente ecuación:

$$Q_c = m \times C_p \times \Delta T^\circ \quad (3)$$

Donde:

- Q_c : Calor necesario para calentamiento.
- m : peso de palanquilla

- C_p : Calor específico del acero AISI 1015.
- ΔT° : variación de temperatura.

Una vez obtenido este valor se deduce que la cantidad de energía para el calentamiento se debe suministrar en el tiempo de permanencia que se calcula de la manera indicada anteriormente. Es necesario tener en cuenta que este valor es necesario para una sola palanquilla; la longitud útil del horno es de 14030mm de los cuales 400mm los cubre la puerta de deshorne, por lo tanto, la longitud por la cual se mueven las palanquillas es de 13630mm dando de esta manera la capacidad total del horno equivalente a 104 palanquillas. El valor obtenido en el tiempo mencionado se debe multiplicar por las 104 palanquillas del horno para de esta manera hallar el valor real de energía necesarias para el calentamiento de todas las barras hasta la temperatura deseada.

Para efectos de asegurar que las palanquillas alcancen la temperatura adecuada se asume un 20% de sobrecalentamiento.

6.3.4 Pérdidas de calor por paredes y techo del horno

El horno de calentamiento está conformado por tres zonas que se diferencian porque cada una tiene temperaturas diferentes en comparación con las otras, estas son llamadas: zona de precalentamiento o humos (800°C), zona de calentamiento (Max. 1275°C) y la zona de igualación (Max. 1250°C), en cada una de las zonas se presentan pérdidas diferentes, puesto que todas son de longitudes diferentes, las pérdidas de calor por distintos mecanismos en cada una de las zonas dependerán de muchos factores y medidas, las cuales se pueden encontrar en el anexo B.

6.3.4.1 Pérdidas de calor en la zona de precalentamiento o humos

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Ancho del horno:** 2,370m
- **Alto del horno:** 2,585m
- **Perímetro del horno:** 9,91m
- **Longitud de la zona de calentamiento:** 8m
- **Área de zona de calentamiento (A_1):** $79,28\text{m}^2$
- **Espesor del refractario (X_1):** 0,2286m

- **Conductividad térmica del refractario (K_1):** 0,51 W/ m. K¹⁶
- **Espesor de la carcasa del horno (X_2):** 0,00635m
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K_2):** 57,9 W/ m. K
- **Temperatura promedio de la zona (T_1):** 800°C (1073,15K)
- **Temperatura del exterior del horno (T_2):** 25°C (298,15K)

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de precalentamiento o humos se realiza por el mecanismo de transferencia de calor por conducción que está dada por la siguiente expresión:

$$Q_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{X}{K} \right)} \times A \quad (4)$$

Donde:

Q: Calor perdido (W)

T_1 : Temperatura inicial (K)

T_2 : Temperatura final (K)

X: Espesor del material (m)

K: conductividad térmica del material (W/m. K)

A: área por la cual se pierde calor (m²)

En esta zona se generan pérdidas de calor en los gases de combustión que salen por la chimenea. Para este estudio no se tendrán en cuenta, puesto que este calor será reutilizado para el precalentamiento del aire para el proceso de combustión.

6.3.4.2 Pérdidas de calor en la zona de calentamiento

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

¹⁶ MORGAN ADVANCE MATERIALS. Ficha técnica de ladrillos refractarios, JM 32, conductividad térmica, página 2

- **Ancho del horno:** 2,370m
- **Alto del horno:** 2,585m
- **Perímetro del horno:** 9,91m
- **Longitud de la zona de calentamiento:** 4,5m
- **Área de zona de calentamiento (A_1):** 44,6m²
- **Espesor del refractario (X_1):** 0,2286m
- **Conductividad térmica del refractario (K_1):** 0,56 W/ m. K
- **Espesor de la carcasa del horno (X_2):** 0,00635m
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K_2):** 57,9 W/ m. K
- **Temperatura promedio de la zona (T_1):** 1275°C (1548,15K)
- **Temperatura del exterior del horno (T_2):** 35°C (298,15K)

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de calentamiento se realizan por el mecanismo de transferencia de calor por conducción y está dada por la siguiente expresión:

$$Q_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{X}{K} \right)} \times A \quad (5)$$

Las variables son las mismas presentadas en el punto anterior.

6.3.4.3 Pérdidas de calor en la zona de igualación

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Ancho del horno:** 2,370m
- **Alto del horno:** 2,585m
- **Perímetro del horno:** 9,91m
- **Longitud de la zona de calentamiento:** 4m
- **Área de zona de calentamiento (A_1):** 39,6m²
- **Área de zonas abiertas al ambiente:** 0,912 m²
- **Área de pérdidas por conducción:** 38,7 m²

- **Área de pérdidas por Radiación:** 0,912m²
- **Espesor del refractario (X₁):** 0,2286m
- **Conductividad térmica del refractario (K₁):** 0,56 W/ m. K
- **Espesor de la carcasa del horno (X₂):** 0,00635m
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K₂):** 57,9 W/ m. K
- **Temperatura promedio de la zona (T₁):** 1275°C (1548,15K)
- **Temperatura del exterior del horno (T₂):** 35°C (298,15K)
- **Constante de Boltzmann (∇):** 5,676 × 10⁻⁸ W/ m². K⁴

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de calentamiento se realiza por el mecanismo de transferencia de calor por conducción (Q₃) y radiación (Q₄).

Para el caso del mecanismo de transferencia de calor por conducción:

$$Q_3 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{X}{K} \right)} \times A \quad (6)$$

Para el mecanismo de transferencia de calor por radiación:

$$Q_4 = \nabla \times A \times T_1^4 \quad (7)$$

Donde:

Q₄: Calor perdido por radiación (W).

∇: Constante de Boltzmann (W/ m². K⁴).

A: área por la cual se pierde calor.

T₁: Temperatura inicial (K).

6.3.4.4 Pérdidas totales por paredes y techo del horno

Este cálculo es la sumatoria de todas las pérdidas que se presentan a lo largo de la longitud del horno, teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de transferencia de calor que se puedan presentar allí, se realiza con la siguiente expresión:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (8)$$

Donde:

Q_p = Calor total perdido por las paredes y el techo (Kcal/h).

Q_1 = Calor perdido por conducción en la zona de precalentamiento (Kcal/h).

Q_2 = Calor perdido por conducción en la zona de calentamiento (Kcal/h).

Q_3 = Calor perdido por conducción en la zona de igualación (Kcal/h).

Q_4 = Calor perdido por radiación en la zona de igualación (Kcal/h).

6.3.5 Calor total suministrado al horno para su operación

Este cálculo es la sumatoria del calor suministrado a las palanquillas para su calentamiento teniendo en cuenta el 20% de sobrecalentamiento mencionado anteriormente y el calor total perdido por las paredes y el techo del horno. Esta cantidad de calor será la base para determinar la cantidad de combustible que debe ser suministrado y de igual manera la cantidad total de aire para la combustión, se realiza con la siguiente expresión:

$$Q_T = Q_c + Q_p \quad (9)$$

Donde:

Q : Calor total suministrado para la operación del horno

Q_c : Calor de calentamiento de las palanquillas

Q_p : Calor perdido por las paredes y el techo del horno.

6.3.6 Cantidad de combustible

Para este cálculo es necesario saber la temperatura de entrada de aire de combustión pues la variación de esta hará cambiar el volumen de combustible

inyectado. Para efectos de este cálculo se tomará una temperatura de 280°C aproximadamente, pues el aire será precalentado hasta esta temperatura, es necesario calcular:

6.3.6.1 Calor suministrado al horno por el aire precalentado

Para este cálculo es necesario conocer el volumen de aire a condiciones reales, es decir teniendo en cuenta la cantidad de energía que proporciona el oxígeno, nitrógeno y humedad del aire que entra al horno, teniendo en cuenta las siguientes expresiones:

$$Q_{O_2, N_2} = V \times C_m \times ^\circ T \quad (10)$$

$$Q_{H_2O} = V \times C_m \times ^\circ T \quad (11)$$

Donde:

Q: Calor suministrado por cada uno de los compuestos.

V: volumen de los compuestos. (m³)

C_m= Poder calorífico específico medio de los gases

- C_m (O₂, N₂) = 0,302 + 0,000022 x °T
- C_m (H₂O) = 0,373 + 0,00005 x °T

°T= Temperatura a la que entra el aire (°C)

Los valores obtenidos son sumados para obtener el valor total del calor suministrado por el aire (Q_a) al interior del horno.

6.3.6.2 Calor suministrado al horno por el combustible

Este valor será la diferencia entre el valor del calor que debe ser suministrado al horno para su operación y el valor del calor que proporciona el aire al ser precalentado a la temperatura ya mencionada, así:

$$Q_{\text{combustible}} = Q - Q_a \quad (12)$$

Donde:

$Q_{\text{combustible}}$ = Calor suministrado por el combustible para la operación del horno

Q = Calor necesario para la operación del horno

Q_a = Calor suministrado por el aire para el calentamiento del horno

6.3.6.3 Volumen de combustible inyectado

Para hallar el volumen de combustible es necesario conocer la densidad y el poder calorífico del combustible encontrados en la tabla 2, y aplicando la siguiente ecuación:

$$m = Q_{\text{combustible}} / C_p (13)$$

Donde:

m = Flujo másico de combustible (Kg/h)

$Q_{\text{combustible}}$ = Calor suministrado por el combustible al horno. (Kcal/h)

C_p = poder calorífico inferior del combustible (Kcal/Kg)

6.3.7 Cantidad de aire que debe ser suministrado

Teniendo en cuenta la relación hallada al calcular el volumen de aire que requiere un kilogramo de combustible, se puede hallar el valor del volumen real de aire usando una regla de tres simple, para de esta manera determinar la capacidad con la que deben funcionar los ventiladores, sabiendo que cada ventilador (para aire frío y aire caliente) tiene una capacidad de 1835 m³/h.

6.4 CONDICIONES ACTUALES EN LAS QUE TRABAJA EL HORNO DE CALENTAMIENTO

Las condiciones actuales en las que trabaja el horno fueron medidas con distintos instrumentos, según la necesidad, para el caso de la temperatura que alcanzaba el horno se usó un pirómetro óptico digital para altas temperaturas de referencia Fluke 572-2.

la cantidad de combustible es medida a diario por la diferencia de volumen con el día anterior dentro de los tanques de almacenamiento, la cantidad de aire suministrada está definida por la empresa como un 80% de la capacidad de los

ventiladores para aire frío y caliente, todos los días se proporciona aproximadamente la misma cantidad de aire, con estos datos se puede calcular la cantidad de aire en exceso que entra diariamente al horno teniendo en cuenta la cantidad de aire teórico previamente calculado, con la cual se explica la generación de cascarilla de laminación.

El tiempo que duran las palanquillas dentro del horno esta dado por la longitud de la palanquilla que entra al horno puesto que cuanto más largas sean mayor será el tiempo que tarda una palanquilla en el tren de desbaste 450, es medido por un cronometro.

Estos datos se pueden ver en la tabla 9.

6.5 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE LIMPIEZA DEL HORNO

Este cálculo es muy importante para facilitar el proceso de laminación en caliente de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. pues gracias a este se puede asegurar que el proceso fluya con normalidad durante el mes, evitando paradas no programadas por palanquillas trancadas en el horno, palanquillas pegadas por fusión en las áreas de contacto, entre otros problemas. Se tendrá un parámetro que establece que aproximadamente cada 3000Kg de calamina depositada en el horno se realizara una limpieza, conjunto a esto para el cálculo es necesario conocer:

- W cascarilla promedio húmeda.
- % de humedad
- W cascarilla seca sin tener en cuenta el horno
- W cascarilla real (sacada con experimento mencionado en 6.1)

Seguido a esto se tendrá un peso promedio que se genera diariamente de cascarilla y que se queda atrapada en el horno, al cotejar este dato con el tope de 3000Kg dará la cantidad de días que son necesarios para realizar una limpieza del horno.

6.6 DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

El intercambiador de calor tiene la finalidad de calentar el aire que pasa por él, hasta una temperatura de 280°C aproximadamente, la cual entra a los quemadores para el proceso de atomización y combustión del combustible. La instalación original de los ventiladores fue modificada para hacer que el aire impulsado por cada uno de

ellos se mezcle antes de entrar al intercambiador de calor, por consiguiente, calentando todo el aire que ingresa a los quemadores.

Los cálculos se realizarán escogiendo como coraza y tubos el tipo de intercambiador más adecuado para este proceso, debido a que por su flujo cruzado de gases respecto al aire presenta mayor área de contacto, calentando de manera más eficiente el aire que fluye a través de los tubos.

Para realizar el diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos es necesario tener en cuenta el diseño térmico, en el cual se realiza el análisis termodinámico del equipo en donde se puede conocer la tasa de transferencia de calor. También se escoge el método con el cual se va a realizar el diseño, en este caso se realiza el diseño del equipo por medio del método de diseño de LMTD (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica), en donde es necesario conocer de las temperaturas de entrada y de salida, además del flujo másico de los fluidos, de tal manera que es posible determinar el área de transferencia de calor. Luego se prosigue a encontrar el coeficiente global de transferencia de calor. Este coeficiente se define en términos de la resistencia térmica total a la transferencia de calor entre dos fluidos. Es aquí donde influyen muchos factores que implican características del flujo, propiedades de los dos fluidos, dimensiones de los conductos, entre otros¹⁷.

Para la fabricación de este intercambiador de calor se cuenta con tubería de acero al carbono de 1" de diámetro cedula 40 de 85 cm de longitud como máximo, debido a que la parte disponible para su instalación tiene un área de 1,10m x 0,85m. teniendo en cuenta eso se tiene que:

6.6.1 Caudal másico

Este se define como la cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un aparato de flujo, para este cálculo es necesario conocer el flujo de aire volumétrico o caudal que pasara a través del intercambiador de calor, el cual es encontrado en el ítem (6.3.7), y la densidad del aire, usando la siguiente expresión:

$$m= q \cdot \rho \text{ (14)}$$

¹⁷ ROJAS, Sonia. Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos. Tesis profesional en ingeniería mecánica. Universidad Santo Tomas. 2014. Pág. 38.

Donde:

m : Caudal másico de aire

q : Caudal o Flujo volumétrico de aire

ρ : Densidad del aire (1,225 Kg/ m³)

6.6.2 Delta de temperatura

Este cálculo es realizado para el gas saliente por la chimenea y el aire que entra y sale del intercambiador de calor, se define como la diferencia entre las temperaturas de salida y de entrada del intercambiador de calor de coraza y tubos. Esta diferencia es la fuerza motriz, mediante la cual el calor se transfiere desde la fuente al receptor, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\Delta^{\circ}T_1 = ^{\circ}T_{\text{salida}} - ^{\circ}T_{\text{entrada}} \quad (15)$$

$$\Delta^{\circ}T_2 = ^{\circ}T_{\text{salida}} - ^{\circ}T_{\text{entrada}} \quad (16)$$

Donde:

$\Delta^{\circ}T_1$: Delta de temperatura de los gases de chimenea (°F)

$\Delta^{\circ}T_2$: Delta de temperatura del aire (°F)

Para este cálculo se debe tener en cuenta los siguientes valores:

- $^{\circ}T$ entrada de los gases de chimenea al intercambiador: 500°C (932°F)
- $^{\circ}T$ salida de los gases de chimenea del intercambiador: 350°C (662°F)
- $^{\circ}T$ entrada del aire al intercambiador: 40°C (104°F)
- $^{\circ}T$ salida del aire del intercambiador: 280°C (536°F)

6.6.3 Promedio de flujo de calor

Se define como el producto entre el flujo másico del fluido, el calor específico del agua y la diferencia de temperaturas del intercambiador de calor de coraza y tubos,

se calcula mediante la siguiente ecuación tanto para el gas saliente como para el aire entrante:

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta^{\circ}T \quad (17)$$

donde:

q: Flujo de calor presentado en el sistema.

m: Caudal másico de aire y de gases.

C_p: poder calorífico de aire y de gases

- $C_{p \text{ gases}} = 0,2658 \frac{BTU}{lb^{\circ}F}$
- $C_{p \text{ aire}} = 0,2434 \frac{BTU}{lb^{\circ}F}$

$\Delta^{\circ}T$: Delta de temperatura de gas y de aire.

El flujo másico de los gases de chimenea corresponde a un 75% del flujo másico del aire que entra al intercambiador; una vez encontrados estos valores (para gas y aire) es necesario realizar un promedio entre los dos para encontrar el promedio de flujo de calor.

6.6.4 Diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (Log Mean Temperature Difference)

El LMTD es un método de diseño, en el cual es necesario conocer las temperaturas de entrada y de salida, además del flujo másico de los fluidos siendo posible determinar el área de transferencia de calor siguiendo un procedimiento lógico y adecuado, se halla mediante la siguiente ecuación:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (18)$$

6.6.5 Temperatura media efectiva

Este cálculo se realiza aplicando un factor de corrección a la diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiadores de calor de coraza y tubos de flujo cruzado, este factor de corrección se puede encontrar en el anexo D y es aplicado a la siguiente ecuación:

$$\Delta^{\circ}T_{\text{media efectiva}} = F \cdot (\text{LMTD}) \quad (19)$$

Donde:

F: factor de corrección de temperatura (0,97)

LMTD: diferencia de temperatura media logarítmica (°F)

6.6.6 Coeficiente global de transferencia de calor (U_o)

Se define como la cantidad de calor total transferido por unidad de superficie ante una variación de un grado Celsius. Este coeficiente es uno de los más importantes pasos a realizar en el análisis térmico de un intercambiador de calor de coraza y tubos ya que es evaluado entre las dos corrientes, está establecido en tablas para facilitar el proceso de diseño de intercambiadores de calor, en las cuales se tiene en cuenta el fluido enfriándose y el fluido calentándose de igual modo, para este caso es gas de chimenea como fluido enfriándose y aire como fluido calentándose¹⁸. este valor puede ser encontrado en la tabla mostrada en el anexo E.

6.6.7 Área total de transferencia de calor

Corresponde a el área total disponible para la transferencia de calor entre los dos fluidos, para intercambiadores de calor de coraza y tubos corresponde a la suma del área superficial total de los tubos que componen el intercambiador de calor, es determinada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{q}{U_o \cdot \Delta^{\circ}T_{me}} \quad (20)$$

¹⁸ ROJAS, Sonia. Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos. Tesis profesional en ingeniería mecánica. Universidad Santo Tomas. 2014. Pág. 30-34.

Donde:

A: Área total de transferencia de calor (Pie²).

q: Flujo de calor (BTU/h).

U_o: coeficiente global de transferencia de calor (BTU/ h. pie². °F).

ΔT_{me}: Delta de temperatura media efectiva (°F).

6.6.8 Número total de tubos

Como se mencionó anterior mente se usará tubería de acero al carbono de 1" cedula 40, cuyas especificaciones se encuentran en la tabla del anexo F. La cantidad total de tubos se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\text{N° Tubos} = \frac{A}{\pi \cdot D_o \cdot L} \quad (21)$$

Donde:

A: Área total de transferencia de calor (Pie²).

D_o: Diámetro externo de la tubería (1,315" = 0,344Pie)

L: Longitud de la tubería (85cm = 2,78pie)

6.7 EVIDENCIA DE RESULTADOS

Una vez realizados los cambios al proceso con los resultados obtenidos se continua con la toma de datos durante un periodo de dos semanas usando el experimento mencionado anteriormente qué consiste en introducir una palanquilla marcada y pesada al horno de calentamiento, tomando el tiempo que tarda en ser deshornada y posteriormente removiendo la cascarilla generada y pesándola nuevamente, para de esta manera por diferencia de pesos obtener el valor en porcentaje de calamina que es producida al interior del horno, estos datos serán mostrados en la tabla 10, los valores de los cambios realizados a el proceso se evidenciaran en la tabla 11, los cuales en conjunto mostraran el resultado final del estudio.

7. RESULTADOS, DISCUSIÓN, ANÁLISIS E IMPACTO EN EL PROCESO.

7.1 DATOS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE DE MEPSA

Tabla 5. Pesos del proceso de laminación en caliente

Dia	Producto	Palanquilla entrante (Kg)	combustible (gal)	N° Paquetes 1	Peso promedio paquetes 1 (kg)	N° Paquetes 2
1	Cuadrado 9mm	55559,9	933	16	967	36
2	Cuadrado 1/2"	75226,3	606	46	967	28
3	Cuadrado 12mm	85016,4	1758	35	968	45
4	Cuadrado 11mm	82503,3	1163	37	965	42
5	Cuadrado 5/8", 3/4"	95250,2	1380	44	970	49
6	Liso 5/8"	95511,3	1646	44	970	48
7	Liso 1 1/8"	88304,3	1210	40	970	45
8	Liso 1 1/4"	114070	1434	51	974	58
9	Liso 12mm	87444	1165	33	974	48
10	Liso 3/4", 1"	89231	1171	40	966	47
11	Platina 3" x 1/4"	29172	937	7	964	19
12	Platina 1 1/4" x 3/16"	74786,7	995	23	996	48
13	Platina 1 1/2" x 3/16"	77348,9	914	51	984	23
14	Platina 1 1/2" x 3/16", 1" x 3/16"	70316,7	1253	39	971	29
15	Platina 1 1/2" x 1/4"	74096,2	707	39	977	32
16	Platina 1" x 1/8"	61842,6	2082	30	975	28
17	Platina 3/4" x 3/16", 3/4" x 1/4"	73290,4	1081	32	968	38
18	Platina 1 1/4" x 1/8", 1 1/2" x 1/8"	58539,8	1056	21	976	33
19	Platina 2 1/2" x 3/16"	54136,8	887	33	970	17
20	Platina 3" x 1/4"	49498,6	1040	13	959	32
		74557,27	1170,9			

Peso promedio paquetes 2 (kg)	Producto Terminado (Kg)	Combustible por Tonelada (gal/Ton)	Mermas (Kg)	Cascarilla húmeda (Kg)	% Humedad
975	50572	16,7	1933	1810	10,02
970	71642	8,0	2303	2750	8,51
974	77710	20,6	2723	1740	11,6
974	76613	14,0	2503	2700	9,75
969	90161	14,4	2173	2084	11,75
969	89192	17,2	3509	1858	10,5
980	82900	13,7	3937	2163	10,32
974	106166	12,5	5238	1846	13,17
981	79230	13,3	3082	2222	15,2
972	84324	13,1	3689	1218	34,1
981	25387	32,1	2638	1654	6,89
968	69372	13,3	2626	2364	8,94
984	72816	11,8	2346	2120	17,08
971	66028	17,8	2404	1990	6,58
966	69015	9,5	3038	2465	9,6
973	56494	33,6	2621	2050	5,31
967	67722	14,7	2950	1952	12,9
972	52572	18,0	2003	1680	7,08
978	48636	16,3	2545	2843	18,8
964	43315	21,0	2811	2033	12,01
		16,6		2077,1	12,0055

Fuente. Autor

En la tabla anterior se puede evidenciar un seguimiento detallado de los pesos de ingreso y salida del proceso de laminación en caliente de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. durante un tiempo establecido de cuatro semanas laboradas, donde se evidencia el contenido de humedad que tiene la cascarilla de laminación que es extraída de distintas partes del proceso a diario.

A continuación, se muestra el resultado el experimento propuesto para conocer un porcentaje real de generación de cascarilla de laminación.

Tabla 6. Generación de oxido de hierro en el proceso de calentamiento

Dia	Peso de entrada (Kg)	Peso de salida (Kg)	Peso perdido (Kg)	Tiempo de permanencia	% Cascarilla
1	95,3	92,9	2,4	2h 45min	2,5
2	132,6	128,6	4	2h 50min	3,0
3	132,2	128,9	3,3	3h 45min	2,4
4	108,7	105,7	3	3h10min	2,7
5	134,8	131,1	3,7	3h 20min	2,7
6	123,9	120,8	3,1	3h	2,5
7	124,9	121,4	3,5	3h 25min	2,8
8	152,5	148,1	4,4	2h 10min	2,8
9	126,1	122,8	3,3	3h 10min	2,6
10	139	135,2	3,8	3h 15min	2,7
11	137,3	133,9	3,4	3h 40min	2,4
12	137,7	133,4	4,3	4h 10min	3,1
13	128,7	125	3,7	2h 25min	2,8
14	108,7	106,1	2,6	2h 45min	2,3
15	125,8	122	3,8	3h	3,0
16	84,6	82,9	1,7	2h 40min	2,0
17	94,4	91	3,4	3h 45min	3,6
18	96,1	93,9	2,2	3h 20min	2,2
19	123,6	120,5	3,1	3h 10min	2,5
			3,3		2,7

Fuente. Autor

El porcentaje generado de óxido de hierro no supera el 3% el cual es considerado un nivel crítico para la empresa, debido a que este se convierte en pérdidas económicas que no hacen viable el proceso.

7.2 VARIABLES QUE GENERAN OXIDACIÓN EN LA PALANQUILLA

Tabla 7. Variables que generan oxidación sobre la palanquilla

Dia	Material de palanquilla	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de permanencia	Consumo de combustible (gal/Ton)	% Cascarilla
1	Acero AISI 1015	1230	2h 45min	16,7	2,5
2	Acero AISI 1015	1200	2h 50min	8,0	3,0
3	Acero AISI 1015	1222	3h 45min	20,6	2,4
4	Acero AISI 1015	1233	3h10min	14,0	2,7
5	Acero AISI 1015	1241	3h 20min	14,4	2,7
6	Acero AISI 1015	1208	3h	17,2	2,5
7	Acero AISI 1015	1229	3h 25min	13,7	2,8
8	Acero AISI 1015	1241	2h 10min	12,5	2,8
9	Acero AISI 1015	1211	3h 10min	13,3	2,6
10	Acero AISI 1015	1198	3h 15min	13,1	2,7
11	Acero AISI 1015	1240	3h 40min	32,1	2,4
12	Acero AISI 1015	1223	4h 10min	13,3	3,1
13	Acero AISI 1015	1215	2h 25min	11,8	2,8
14	Acero AISI 1015	1233	2h 45min	17,8	2,3
15	Acero AISI 1015	1244	3h	9,5	3,0
16	Acero AISI 1015	1219	2h 40min	33,6	2,0
17	Acero AISI 1015	1241	3h 45min	14,7	3,6
18	Acero AISI 1015	1229	3h 20min	18,0	2,2
19	Acero AISI 1015	1227	3h 10min	16,3	2,5
		1225,473684		16,6	2,7

Fuente. Autor

Como se ha mencionado anteriormente existen variables que influyen directamente en la generación de óxido de hierro sobre la palanquilla, las cuales son:

- Material de palanquilla.
- Temperatura de calentamiento.
- Tiempo de permanencia.
- Proceso de combustión.

El material de la palanquilla no cambia en su composición, se trata de un acero AISI 1015 proporcionado por la empresa SIDOC, el cual tiene la siguiente composición:

Tabla 8. Composición de aceros de bajo carbono

Grade Designation	Heat Chemical Ranges and Limits, %			
	Carbon	Manganese	Phosphorus, max	Sulfur, max ^A
Nonresulfurized Carbon Steels ^{B,C, D,E,F}				
1005	0.06 max	0.35 max	0.040	0.050
1006	0.08 max	0.25–0.40	0.040	0.050
1008	0.10 max	0.30–0.50	0.040	0.050
1010	0.08–0.13	0.30–0.60	0.040	0.050
1011	0.08–0.13	0.60–0.90	0.040	0.050
1012	0.10–0.15	0.30–0.60	0.040	0.050
1013	0.11–0.16	0.50–0.80	0.040	0.050
1015	0.13–0.18	0.30–0.60	0.040	0.050
1016	0.13–0.18	0.60–0.90	0.040	0.050
1017	0.15–0.20	0.30–0.60	0.040	0.050
1018	0.15–0.20	0.60–0.90	0.040	0.050
1019	0.15–0.20	0.70–1.00	0.040	0.050
1020	0.18–0.23	0.30–0.60	0.040	0.050

Fuente. ASTM A29. Grade Designations and Chemical Compositions of Carbon Steel Bars.2015. Pág. 3.

Los aceros con contenidos de carbono y manganeso más alto tienden a oxidarse menos que los aceros con contenidos más bajos de estos elementos.

La empresa Metales y Procesos del Oriente tiene un rango establecido de temperatura para el calentamiento de las palanquillas el cual corresponde a 1100°C hasta 1250°C que como se explicó antes es una temperatura en la cual el acero está en estado de recristalización, óptima para el proceso de laminación en caliente. Cuanto más se caliente una palanquilla mayor será la cinética de las reacciones de oxidación que se presentan en la superficie de las palanquillas.

El tiempo de permanencia varia debido a las paradas no programadas en el proceso, también a la longitud de las palanquillas que varía según el producto que se quiera obtener.

Respecto al consumo de combustible es evidente que cuando más se inyecta combustible menos es el porcentaje de generación de cascarilla, esto es debido a que a diario se inyecta la misma cantidad de aire y por consiguiente cuando más se agrega combustible más cerca se encuentra del proceso estequiométrico de combustión, disminuyendo o aumentando la cantidad de aire en exceso que entra al horno, y por lo tanto cuando más oxígeno libre se encuentre en la atmósfera más oxidación habrá en la superficie de las palanquillas.

7.3 CONDICIONES CON LAS CUALES DEBE TRABAJAR EL HORNO DE CALENTAMIENTO

7.3.1 Cálculo del tiempo de permanencia de la palanquilla dentro del horno

Datos para el cálculo:

- Requisito de producción: una palanquilla cada 90 seg.
- Dimensiones máximas de la palanquilla: 130mm x 130mm x 1500mm
- Longitud útil del horno: 14030mm

Según los datos presentados se tiene que como cada 90 segundos requiere procesar una palanquilla en el tren de desbaste 450, y cada palanquilla tiene 130mm de ancho, entonces:

$$\text{Cálculo de tiempo} = 14030\text{mm} \frac{90\text{seg}}{130\text{mm}}$$

$$\text{Cálculo de tiempo} = \mathbf{9713,0 \text{ seg}}$$

$$\text{Cálculo de tiempo} = \mathbf{2,7 \text{ horas}}$$

Según el cálculo mostrado anteriormente se tiene que cada palanquilla de tener un tiempo de duración mínimo de 2 horas y 42 minutos. Y teniendo en cuenta un 20% de exceso de calentamiento para dar un intervalo en el cual se asegura la temperatura deseada pensando en las paradas del proceso no programadas se obtiene que:

Cálculo de tiempo = 2,7 horas x 1,2

Cálculo de tiempo = 3,2 horas

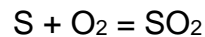
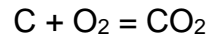
Por efectos de paradas y descanso de los operarios, se tendrá un intervalo de entre 2 horas 42 minutos a 3 horas 14 minutos, el salir de este intervalo de tiempo dará problemas de sobrecalentamiento y mayor exposición en atmosferas corrosivas lo cual puede aumentar la producción de óxido de hierro sobre la superficie de las palanquillas de acero.

7.3.2 Cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión

Para el proceso de combustión del horno de calentamiento, el aire es introducido con el fin de hacer que los elementos combustibles del fuel oil N°6 reaccionen con el oxígeno del mismo produciendo así los productos de combustión que salen por los humos de chimenea, este cálculo es realizado a condiciones estándar de un gas.

Base de Cálculo: 1Kg de combustible

- **Reacciones:**



- **Carbono del combustible que es quemado:**

Cenizas = Ceniza + Carbono no quemado.

$$C \text{ no quemado} = 0,00085 \text{ Kg} \times \frac{14,9 \%}{100 \%} = 0,000126 \text{ Kg}$$

$$C \text{ quema} = 0,8501 \text{ Kg} - 0,000126 \text{ Kg} = 0,8499 \text{ Kg}$$

- **Oxigeno requerido para la combustión:**

$$0,8499 \text{ Kg de C} \times \frac{32\text{Kg de O}_2}{12\text{Kg de C}} + 0,1146 \text{ Kg de H}_2 \times \frac{16\text{Kg de O}_2}{2\text{Kg de H}_2} + 0,0175\text{Kg de S} \times \frac{32\text{Kg de O}_2}{32\text{Kg de S}}$$

$$\text{O}_2 \text{ requerido} = \mathbf{3,2007 \text{ Kg}}$$

- **Volumen de aire teórico seco necesario para la combustión:**

$$\text{Aire teórico requerido seco} = 3,2007\text{kg de O}_2 \times \frac{22,4 \text{ m}^3}{32 \text{ Kg O}_2} \times \frac{100\%}{21\%}$$

$$\text{Aire teórico requerido seco} = 10,669 \text{ m}^3 \times (1,1)$$

$$\text{Aire teórico requerido seco} = 11,736 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta los datos encontrados en la tabla 4 y la ley de los gases combinados se tiene que:

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 17,5\text{mmHg} \times \left(\frac{83\%}{100\%}\right)$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 14,52\text{mmHg}$$

$$P_{\text{aire seco}} = 659,6\text{mmHg} - 14,52\text{mmHg}$$

$$P_{\text{aire seco}} = 645,08\text{mmHg}$$

Teniendo en cuenta esto, despejando V_2 de la ley de los gases combinados encontramos:

$$V_2 = \frac{(760\text{mmHg}) \times (11,736\text{m}^3) \times (293\text{K})}{(645,08\text{mmHg}) \times (273\text{K})}$$

$$\mathbf{V_2 = 14,83\text{m}^3}$$

Con este resultado se deduce que por cada kilogramo de combustible inyectado se deberá suministrar 14,83m³ de aire que lleva humedad y otras impurezas no medibles, la humedad será medida de la siguiente manera:

$$\text{Aire húmedo} = \text{aire seco} + \text{humedad}$$

$$\text{Humedad} = 14,83 \text{ m}^3 - 11,736 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 3,09 \text{ m}^3$$

Este volumen de humedad equivale a un 20,8% del volumen total de aire, teniendo un bajo contenido de humedad se puede aumentar la eficiencia del proceso de combustión pues la cantidad de oxígeno que reacciona como comburente será mayor, disminuyendo de esta manera el consumo de combustible

7.3.3 Cálculo de calor necesario para calentar las palanquillas:

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Material:** Acero AISI 1015
- **Peso máximo de palanquilla:** 198Kg
- **Capacidad del horno:** 104 palanquillas
- **Calor específico del acero:** 0,11 Kcal/ Kg. °C
- **Temperatura inicial:** 15°C
- **Temperatura final:** 1250°C

El calor sensible de las palanquillas se evalúa en función de la ecuación 3:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T^\circ$$

$$Q = 198\text{Kg} \times 0,11 \text{ Kcal/ Kg. }^\circ\text{C} \times (1250^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})$$

$$Q = 26.898,3 \text{ Kcal}$$

26898,3 kcal es el calor que debe recibir una palanquilla para calentarse desde 15°C hasta 1250°C, para las condiciones de trabajo de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. se tiene que partiendo del cálculo anterior donde se determina

que una palanquilla debe permanecer un tiempo mínimo de 2,698 horas entonces se tiene que:

$$Q = \frac{26.898,3 \text{ Kcal}}{2,698 \text{ h}}$$

$$Q = 9.969,72 \text{ Kcal/h}$$

Por consiguiente, el calor total que debe ser suministrado para el calentamiento de todas las palanquillas (Q_c) será:

$$Q_c = 104 \times 9.969,72 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_c = 1.036.850,88 \text{ Kcal/h}$$

7.3.4 Cálculo de pérdidas de Calor por paredes y techo en el horno de calentamiento:

La carcasa del horno de calentamiento está hecha de una chapa de acero de $\frac{1}{4}$ " de espesor, según esto se tiene lo siguiente, las medidas mencionadas a continuación pueden ser identificadas en los planos estructurales del horno encontrados en el Anexo B.

7.3.4.1 Pérdidas de calor en zona de Precalentamiento o Humos

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Ancho del horno:** 2,370m
- **Alto del horno:** 2,585m
- **Perímetro del horno:** 9,91m
- **Longitud de la zona de calentamiento:** 8m
- **Área de zona de calentamiento (A_1):** 79,28m²
- **Espesor del refractario (X_1):** 0,2286m
- **Conductividad térmica del refractario (K_1):** 0,51 W/ m. K
- **Espesor de la carcasa del horno (X_2):** 0,00635m
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K_2):** 57,9 W/ m. K

- **Temperatura promedio de la zona (T₁): 800°C (1073,15K)**
- **Temperatura del exterior del horno (T₂): 25°C (298,15K)**

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de precalentamiento o humos se realiza por el mecanismo de transferencia de calor por conducción y está dada por la ecuación 4:

$$Q_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{x}{K} \right)} \times A$$

$$Q_1 = \frac{(1073,15K - 298,15K)}{\left(\frac{0,2268m}{0,51 \frac{W}{mK}} \right) + \left(\frac{0,00635m}{57,9 \frac{W}{mK}} \right)} \times 78,28m^2$$

$$Q_1 = 138.129,1 \text{ W}$$

$$Q_1 = 118.769,64 \text{ Kcal/h}$$

7.3.4.2 Pérdidas de calor en zona de calentamiento:

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Ancho del horno: 2,370m**
- **Alto del horno: 2,585m**
- **Perímetro del horno: 9,91m**
- **Longitud de la zona de calentamiento: 4,5m**
- **Área de zona de calentamiento (A₁): 44,6m²**
- **Espesor del refractario (X₁): 0,2286m**
- **Conductividad térmica del refractario (K₁): 0,56 W/ m. K**
- **Espesor de la carcasa del horno (X₂): 0,00635m**
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K₂): 57,9 W/ m. K**
- **Temperatura promedio de la zona (T₁): 1275°C (1548,15K)**
- **Temperatura del exterior del horno (T₂): 45°C (318,15K)**

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de calentamiento se realiza por el mecanismo de transferencia de calor por conducción y está dada por la ecuación 5:

$$Q_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{x}{K} \right)} \times A$$

$$Q_2 = \frac{(1548,15K - 318,15K)}{\left(\frac{0,2268m}{0,56 \frac{W}{mK}} \right) + \left(\frac{0,00635m}{57,9 \frac{W}{mK}} \right)} \times 44,6m^2$$

$$Q_2 = 114.635,624 \text{ W}$$

$$Q_2 = 98.568,89 \text{ Kcal/h}$$

7.3.4.3 Pérdidas de calor en zona de igualación:

Para este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

- **Ancho del horno:** 2,370m
- **Alto del horno:** 2,585m
- **Perímetro del horno:** 9,91m
- **Longitud de la zona de calentamiento:** 4m
- **Área de zona de calentamiento (A₁):** 39,6m²
- **Área de zonas abiertas al ambiente:** 0,912 m²
- **Área de pérdidas por conducción:** 38,7 m²
- **Área de pérdidas por Radiación:** 0,912m²
- **Espesor del refractario (X₁):** 0,2286m
- **Conductividad térmica del refractario (K₁):** 0,56 W/ m. K
- **Espesor de la carcasa del horno (X₂):** 0,00635m
- **Conductividad térmica de la carcasa del horno (K₂):** 57,9 W/ m. K
- **Temperatura promedio de la zona (T₁):** 1245°C (1518,15K)
- **Temperatura del exterior del horno (T₂):** 35°C (298,15K)

- **Constante de Boltzmann (∇):** $5,676 \times 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}^4$

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el techo en la zona de calentamiento se realiza por el mecanismo de transferencia de calor por conducción y radiación, y está dada por la ecuación 6 para el mecanismo de conducción:

$$Q_3 = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum \left(\frac{x}{K} \right)} \times A$$

$$Q_3 = \frac{(1518,15\text{K} - 308,15\text{K})}{\left(\frac{0,2268\text{m}}{0,56 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} \right) + \left(\frac{0,00635\text{m}}{57,9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} \right)} \times 44,6\text{m}^2$$

$$Q_3 = 135.114,8 \text{ W}$$

$$Q_3 = 116.117,8 \text{ Kcal/h}$$

Y por la ecuación 7 para el mecanismo de radiación:

$$Q_4 = \nabla \times A \times T_1^4$$

$$Q_4 = (5,676 \times 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}^4) \times (0,912 \text{ m}^2) \times (1518,15 \text{ K})^4$$

$$Q_4 = 274.976 \text{ W}$$

$$Q_4 = 236.436,8 \text{ Kcal/h}$$

7.3.4.4 Pérdidas de Calor totales del horno por paredes y techo

Según la ecuación 8, se tiene:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$Q_p = 118.769,64 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 116.117,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 98.568,89 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 236.436,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_p = 569.892,24 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

7.3.5 Cálculo del Calor total suministrado al horno para su operación

Con la finalidad de asegurar que las palanquillas alcancen la temperatura adecuada se asume un 20% de sobrecalentamiento, teniendo entonces:

$$Q_c = 1.036.850,88 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \times \left(\frac{120\%}{100\%} \right)$$

$$Q_c = 1.244.221,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Por consiguiente, con la ecuación 9:

$$Q_T = Q_c + Q_p$$

$$Q_T = 1.244.221,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 569.892,24 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_T = 1.814.113,34 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

7.3.6 Cantidad de combustible necesario para la operación del horno

En primer lugar, se debe hallar la cantidad de combustible inyectado para un suministro de aire a 273K, teniendo en cuenta el valor de poder calorífico del combustible mencionado en la tabla 2 y el valor de calor suministrado al horno para su operación encontrado en el ítem anterior, aplicando la ecuación 13:

$$m = Q_{\text{combustible}} / C_p$$

$$m = \frac{1.814.113,34 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{10.234,622 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}}$$

$$m = 177,25 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}}$$

$$V_{\text{combustible}} = 177,25 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}} \times \left(\frac{1 \text{ Galon Fuel Oil}}{3,305 \text{ Kg Fuel oil}} \right)$$

$$V_{\text{combustible}} = 53,63 \frac{\text{Galones de Fuel Oil}}{\text{h}}$$

7.3.6.1 Calor suministrado al horno por el aire precalentado

El aire está compuesto por oxígeno, nitrógeno y humedad, los cuales generan energía calórica que entra al horno, disminuyendo así la cantidad de energía que debe suministrar el combustible y por consiguiente bajando el volumen de inyección, el volumen de cada componente usado a continuación fue hallado en el numeral (7.2) y está realizado con una base de cálculo igual a un kilogramo de combustible, por medio de la ecuación 10 y 11 se tiene que:

$$Q_{O_2, N_2} = V \times C_m \times ^\circ T$$

$$Q_{O_2, N_2} = (11,736 \text{ m}^3) \times (0,302 + 0,000022 \times 280^\circ\text{C}) \times 280^\circ\text{C}$$

$$Q_{O_2, N_2} = 1012,63 \text{ Kcal}$$

$$Q_{H_2O} = V \times C_m \times ^\circ T$$

$$Q_{H_2O} = (3,09 \text{ m}^3) \times (0,373 + 0,00005 \times 280^\circ\text{C}) \times 280^\circ\text{C}$$

$$Q_{H_2O} = 334,8 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{aire}} = 1012,63 \text{ Kcal} + 334,8 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{aire}} = 1347,43 \text{ Kcal}$$

Para el consumo de combustible real se tiene:

$$Q_{\text{aire}} = 177,25 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}} \times \left(\frac{1347,43 \text{ Kcal}}{1 \text{ Kg}} \right)$$

$$Q_{\text{aire}} = 238831,96 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

7.3.6.2 Calor suministrado al horno por el combustible

La energía en forma de calor real que debe suministrar el combustible será según la ecuación 12:

$$Q_{\text{real combustible}} = 1814113,34 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} - 238831,96 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{real combustible}} = 1.575.281,38 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

7.3.6.3 Volumen de combustible inyectado

Según la ecuación 13:

$$m = Q_{\text{combustible}} / C_p.$$

$$m = \frac{1.575.281,38 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{10.234,622 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}}$$

$$m = 153,91 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}}$$

Teniendo en cuenta la densidad del combustible se obtendrá:

$$V_{\text{combustible}} = 153,91 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}} \times \left(\frac{1 \text{ Galon Fuel Oil}}{3,305 \text{ Kg Fuel oil}} \right)$$

$$V_{\text{combustible}} = 46,56 \frac{\text{Galones de Fuel Oil}}{\text{h}}$$

Es evidente que el volumen de combustible disminuye aproximadamente 7,07 galones/h, cuando se inyecta la misma cantidad de aire precalentado a 280°C, esto debido a la energía que proporciona el aire precalentado, teniendo en cuenta esta premisa, se puede inyectar aire aún más caliente para disminuir la cantidad de combustible necesario para el proceso de combustión asegurando que se logre la temperatura deseada.

7.3.7 Volumen de aire que debe ser suministrado

Teniendo en cuenta los datos obtenidos y la información suministrada anteriormente se deduce que:

$$V \text{ aire en condiciones reales: } 153,91 \frac{\text{Kg Fuel Oil}}{\text{h}} \times \left(\frac{14,83 \text{ m}^3}{1 \text{ Kg Fuel oil}} \right)$$

$$\mathbf{V \text{ aire a condiciones reales: } 2282,48 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Teniendo en cuenta que cada ventilador es capaz de suministrar 1834,93 m³ / h para el proceso se concluye que los ventiladores pueden trabajar a un 62,2% de su capacidad total, asegurando un suministro de aire suficiente para el proceso de combustión que libera la cantidad de energía necesaria para calentar las palanquillas para el proceso de laminación en caliente.

7.4 CONDICIONES ACTUALES EN LAS QUE TRABAJA EL HORNO

Como se muestra en la tabla 9, es evidente que la temperatura que alcanzan las palanquillas dentro del horno está en el rango permisible para el proceso posterior de laminación en caliente, según los cálculos realizados en puntos anteriores es evidente que existen días en los cuales las palanquillas duran mucho más tiempo del permitido dentro del horno, lo cual tiene como consecuencia un sobrecalentamiento que aumenta la cinética de las reacciones de oxidación sobre las palanquillas, estas demoras son por paradas no programadas en el proceso posterior causadas por daños o cambios de piezas para los distintos productos que se pueden fabricar diariamente.

La relación entre el consumo de combustible y el aire que se inyecta para el proceso de combustible se calculó anteriormente dando como resultado que por cada kilogramo de combustible inyectado se deberá suministrar 14,83m³ de aire que lleva humedad y otras impurezas no medibles, en promedio se inyectan 1170,9 gal/día, como cada día laborado es de 20 horas se tiene un consumo de:

$$\mathbf{\text{Consumo de combustible actual} = 1170,9 \text{ gal/día} \times \left(\frac{1 \text{ día laborado}}{20 \text{ horas}} \right)}$$

$$\mathbf{\text{Consumo de combustible actual} = 58,5 \text{ gal/h}}$$

Tabla 9. Valores de las condiciones actuales de trabajo del horno

Dia	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de permanencia	Consumo de combustible (gal/día)	Entrada de aire (m³/h)	% Cascarilla
1	1230	2h 45min	933	2935,89	2,5
2	1200	2h 50min	606	2935,89	3,0
3	1222	3h 45min	1758	2935,89	2,4
4	1233	3h10min	1163	2935,89	2,7
5	1241	3h 20min	1380	2935,89	2,7
6	1208	3h	1646	2935,89	2,5
7	1229	3h 25min	1210	2935,89	2,8
8	1241	2h 10min	1434	2935,89	2,8
9	1211	3h 10min	1165	2935,89	2,6
10	1198	3h 15min	1171	2935,89	2,7
11	1240	3h 40min	937	2935,89	2,4
12	1223	4h 10min	995	2935,89	3,1
13	1215	2h 25min	914	2935,89	2,8
14	1233	2h 45min	1253	2935,89	2,3
15	1244	3h	707	2935,89	3,0
16	1219	2h 40min	2082	2935,89	2,0
17	1241	3h 45min	1081	2935,89	3,6
18	1229	3h 20min	1056	2935,89	2,2
19	1227	3h 10min	887	2935,89	2,5
	1225,473684		1170,9	2935,89	2,7

Fuente. Autor

58,5 gal/h inyectados junto con aire que está a aproximadamente 40°C de temperatura, lo cual indica que se está inyectando excesivas cantidades de combustible y comburente observando los resultados previamente calculados, aproximadamente un 9,08% de exceso de combustible está entrando al horno para el proceso de combustión, y adicional a esto se está haciendo reaccionar un 26,5% más de aire del que se requiere para la combustión (2282,24m³/h que ya llevaba 10% de aire adicional al teórico) por consiguiente en total está entrando un 36,5% de aire en exceso del que teóricamente es requerido para el proceso de combustión.

Es evidente para la empresa que el porcentaje de calamina que se está generando diariamente es elevado, por lo cual es necesario controlar las variables que producen esta oxidación, teniendo en cuenta los cálculos ya realizados anteriormente.

7.5 PERIODOS DE LIMPIEZA DEL HORNO

Teniendo en cuenta los siguientes datos se puede realizar el cálculo para determinar los periodos de limpieza del horno:

- Requisito de limpieza: cada 3000Kg depositados
- Cascarilla húmeda promedio: 2077,1 Kg (tabla 5)
- %humedad: 12,1 (tabla 5)
- %cascarilla: 87,9 (100-12,1)
- Promedio de palanquilla procesada diariamente: 74557,27 Kg (tabla 5)
- % real de cascarilla: 2,7 (tabla 6)

Cascarilla seca sin tener en cuenta el horno= 2077,1Kg x (0,879)

Cascarilla seca sin tener en cuenta el horno= 1827,7 Kg

W cascarilla real= 74557,27Kg x (0,02703748234)

W cascarilla real= 2015,84 Kg

W de calamina depositada a diario en el horno= 2015,84Kg – 1827,7Kg

W de calamina depositada a diario en el horno= 188,14Kg

$$\text{Periodos de limpieza} = 3000\text{Kg} \times \frac{1 \text{ dia}}{188,14 \text{ Kg}}$$

$$\text{Periodos de limpieza} = 15,9 \text{ días}$$

Cada 15 días laborados en la empresa se debe realizar una limpieza a el horno para retirar toda la calamina que se deposita dentro del mismo, así de esta manera facilitar el flujo del proceso durante el transcurso del mes, y de esta manera solventar problemas en el proceso como pegas de palanquilla por fusión en áreas de contacto por causa de temperaturas elevadas con falta de avance por la calamina depositada.

7.6 DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

El tipo de intercambiador de calor escogido es de coraza y tubos debido al gran valor de transferencia de calor que tiene a causa del flujo cruzado de gases respecto a el aire frio que pasa por los tubos que lo componen.

7.6.1 Calculo de Caudal másico

Para realizar este cálculo es necesario tener los siguientes datos:

q : Flujo de aire volumétrico (2282,48 m³/h)

ρ : Densidad del aire (1,225 Kg/ m³)

aplicando la ecuación 14 se tiene que:

$$m_{aire} = q \cdot \rho$$

$$m_{aire} = (2282,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times (\frac{35,31 \text{ pie}^3}{1 \text{ m}^3}) \times (\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}})) \times (1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (\frac{1 \text{ m}^3}{35,31 \text{ pie}^3}))$$

$$m_{aire} = 46,6 \frac{\text{Kg}}{\text{min}} \times (\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}) \times (\frac{2,20 \text{ libras}}{1 \text{ Kg}})$$

$$m_{aire} = 6151,2 \frac{\text{libras}}{\text{hora}}$$

Este valor será usado para calcular el promedio de flujo de calor más adelante.

7.6.2 Calculo de delta de temperatura

- Para gases saliendo de la chimenea a 500°C, según la ecuación 15:

$$\Delta^{\circ}T_1 = ^{\circ}T_{\text{salida}} - ^{\circ}T_{\text{entrada}}$$

$$\Delta^{\circ}T_1 = 932^{\circ}\text{F} - 662^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta^{\circ}T_1 = 270^{\circ}\text{F}$$

- Para aire entrando al intercambiador de calor a 40°C, según la ecuación 16:

$$\Delta^{\circ}T_2 = ^{\circ}T_{\text{salida}} - ^{\circ}T_{\text{entrada}}$$

$$\Delta^{\circ}T_2 = 536^{\circ}\text{F} - 104^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta^{\circ}T_2 = 432^{\circ}\text{F}$$

Estos valores son necesarios para realizar el calculo promedio de flujo de calor y determinar la diferencia de temperatura media logarítmica LMTD

7.6.3 Calculo de promedio de flujo de calor.

Sabiendo que el flujo másico de los gases corresponde al 75% del flujo másico del aire se tiene que:

$$m_{\text{gases}} = \left(6151,2 \frac{\text{libras}}{\text{hora}}\right) \times 0,75$$

$$m_{\text{gases}} = 4613,4 \frac{\text{libras}}{\text{hora}}$$

- Para gases saliendo de la chimenea, según ecuación 17:

$$q = m. Cp. \Delta^{\circ}T_1$$

$$q = (4613,4 \frac{\text{libras}}{\text{hora}}) \times (0,2658 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}) \times (270^{\circ}\text{F})$$

$$q = 331085,26 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

- Para aire entrando al intercambiador, según ecuación 17:

$$q = m. Cp. \Delta^{\circ}T_2$$

$$q = (6151,2 \frac{\text{libras}}{\text{hora}}) \times (0,2434 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}) \times (432^{\circ}\text{F})$$

$$q = 646791,3 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Por lo tanto, el promedio de flujo de calor es:

$$Q_{\text{promedio}} = \frac{646791,3 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} + 331085,26 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{2}$$

$$Q_{\text{promedio}} = 488938,3 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Este valor representa la cantidad de energía calórica que es transferida para calentar el aire a 280°C, será usado para calcular el área total de transferencia de calor que requiere el intercambiador de calor.

7.6.4 Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (Log Mean Temperature Difference)

Teniendo en cuenta los valores hallados anteriormente y teniendo en cuenta la ecuación 18:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$LMTD = \frac{270^\circ F - 432^\circ F}{\ln \left(\frac{270^\circ F}{432^\circ F} \right)}$$

$$LMTD = 344,68^\circ F$$

7.6.5 Calculo de temperatura media efectiva

Teniendo en cuenta el valor del factor de corrección encontrado en el anexo D aplicado a la ecuación 19, se tiene que:

$$\Delta^\circ T_{\text{media efectiva}} = F \cdot (LMTD)$$

$$\Delta^\circ T_{\text{media efectiva}} = 0,97 \times (344,68^\circ F)$$

$$\Delta^\circ T_{\text{media efectiva}} = 334,33^\circ F$$

7.6.6 Calculo de coeficiente global de transferencia de calor (U_o)

En el anexo E, se encuentra el valor del coeficiente global de transferencia de calor para gas de chimenea como fluido enfriándose y aire como fluido calentándose, este valor corresponde a:

$$U_o = 8 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$$

7.6.7 Calculo del área total de transferencia de calor

Con los valores hallados anteriormente, se tiene que según la ecuación 20:

$$A = \frac{q}{U_o \cdot \Delta^\circ T_{me}}$$

$$A = \frac{488938,3 \frac{BTU}{h}}{\left(8 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}\right) \times (334,33^\circ F)}$$

$$A = 182,80 \text{ ft}^2$$

Este es el área superficial que debe cubrir la tubería que compone el intercambiador de calor, cuyas características ya han sido mencionadas.

7.6.8 Calculo del número total de tubos

Teniendo en cuenta que se usará tubería de 1" cedula 40, con una longitud de 85cm, aplicando la ecuación 21, la cantidad de tubos será:

$$N^\circ \text{ Tubos} = \frac{A}{\Pi \cdot Do \cdot L}$$

$$N^\circ \text{ Tubos} = \frac{182,8 \text{ ft}^2}{\Pi \times 0,344 \text{ ft} \times 2,78 \text{ ft}}$$

$$N^\circ \text{ Tubos} = 191,1 \text{ Tubos}$$

191 tubos con la descripción mencionada representan el área superficial necesaria de transferencia de calor que son dispuestos en ubicación triangular, como se puede observar en los planos encontrados en el anexo G.

Figura 13. Aire saliente del intercambiador de calor



Fuente. Autor.

Como se observa en la figura anterior el aire sale hacia los quemadores a la temperatura propuesta, mostrando el adecuado funcionamiento del intercambiador de calor. La planta cuenta con 1,10 m x 0,80 m para la instalación del intercambiador de calor, por lo cual 191 tubos, El intercambiador de calor de coraza y tubos es instalado dentro de la chimenea, como se muestra a continuación:

Figura 14. Disposición del intercambiador de calor en la chimenea.



Fuente. Autor

En la figura anterior se muestra la chimenea por donde salen los gases calientes representados por un círculo azul, amarillo muestra el ventilador que inyecta aire frío (40°C) al intercambiador de calor, el círculo verde muestra la sección en donde se encuentra instalado el intercambiador de calor, y por último el círculo naranja muestra la tubería por donde sale el aire caliente del intercambiador de calor y que

va directamente a los quemadores del horno. Los planos de la instalación del intercambiador de calor dentro de la chimenea se pueden observar en el anexo H.

7.7 EVIDENCIA DE RESULTADOS

Tabla 10. Nuevas condiciones de trabajo del horno

Día	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de permanencia	Consumo de combustible (gal/día)	Entrada de aire (m³/h)
1	1233	3h 30min	832	2283
2	1242	3h 15min	1100	2283
3	1222	3h 45min	1070	2283
4	1231	3h 20min	998	2283
5	1241	3h 55min	1030	2283
6	1216	3h 20min	952	2283
7	1229	3h 35min	1025	2283
8	1221	3h 20min	1080	2283
9	1219	3h	1103	2283
10	1240	3h 10min	1010	2283
11	1223	3h	1150	2283
12	1215	3h 30min	1059	2283
	1227,666667		1034,083333	

Fuente. Autor

En la tabla anterior se muestran los resultados de los cambios realizados al proceso en base a los cálculos hechos en apartados anteriores, es evidente la disminución de los consumos de aire y de combustible obteniendo una temperatura adecuada para el proceso posterior de laminación en caliente, de esta manera obteniendo una disminución en el gasto monetario para la adquisición de combustible, este cambio se puede explicar gracias a la instalación del intercambiador de calor que inyecta aire precalentado a los quemadores para el proceso de combustión.

A continuación, se muestra el porcentaje de generación de calamina luego de los cambios realizados a el proceso.

Tabla 11. Generación de óxido de hierro posterior a cambios realizados

Día	Peso de entrada (Kg)	Peso de salida (Kg)	Peso perdido (Kg)	Tiempo de permanencia	% Cascarilla
1	126	123,7	2,3	3h 30min	1,9
2	126	123,5	2,5	3h 15min	1,9
3	95	93,2	1,8	3h 45min	1,8
4	122,6	120,2	2,4	3h 20min	1,9
5	152,5	149,5	3	3h 55min	1,9
6	84,6	83	1,6	3h 20min	1,8
7	96,1	94,2	1,9	3h 35min	1,9
8	97,2	95,4	1,8	3h 20min	1,8
9	108,6	106,7	1,9	3h	1,7
10	128,7	126,3	2,4	3h 10min	1,8
11	125,8	123,6	2,2	3h	1,8
12	125,8	123,5	2,3	3h 30min	1,8
					1,9

Fuente. Autor.

Gracias a todos los cambios que se realizaron con el fin de disminuir la cantidad de óxido de hierro que se produce en el horno de laminación en caliente el objetivo del proyecto se cumple a cabalidad, puesto que se logró una disminución notoria del porcentaje de calamina generado pasando de 2,7% a un 1,9%, es decir se consiguió una disminución de 30% lo cual implica una disminución en las pérdidas económicas de la empresa por materia prima desprendida de la palanquilla por oxidación.

A continuación, se muestra la diferencia de espesores que tiene la cascarilla antes y después de realizados los cambios ya mencionados.

Figura 15. Diferencia de espesores de calamina antes y después de cambios realizados al proceso.



Fuente. Autor

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a la metodología propuesta para disminuir y controlar la generación de óxido de hierro dentro del horno de calentamiento de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. se concluye que:

La incorrecta relación entre el aire y el combustible inyectado a los quemadores del horno, junto a un alto tiempo de permanencia de las palanquillas son los principales causantes del elevado porcentaje de óxido de hierro generado en la superficie del material.

La inyección de aire precalentado a los quemadores del horno, disminuye el consumo de combustible por el aporte extra de energía, además de optimizar el proceso de combustión.

La relación aire – combustible calculada es la adecuada para el proceso de laminación en caliente de la empresa, aportando la temperatura adecuada para lograr una ductilidad apropiada.

El rango de tiempo de permanencia calculado es el adecuado para el calentamiento de las palanquillas teniendo en cuenta los distintos productos finales y las paradas no programadas, además del requisito de producción de la empresa.

Con los cambios realizados se logró disminuir la generación de cascarilla dentro del horno de calentamiento en un 30%, mitigando pérdidas económicas a la empresa.

9. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Con el fin de que el proceso de laminación en caliente de la empresa Metales y Procesos del Oriente S.A. fluya con normalidad y evitando el excesivo crecimiento de óxido de hierro en la superficie de la palanquilla que entra al horno de calentamiento se aconseja seguir las siguientes indicaciones:

- En caso de paradas no programadas mayores a 45 minutos se recomienda disminuir la temperatura del horno a un que se encuentre en el rango de 1000°C a 1050°C, manteniendo la relación combustible – aire, mencionada anteriormente.
- Cada 15 días se debe realizar limpieza interna del horno para retirar la calamina y demás impurezas depositadas dentro del mismo.
- Mantener el tiempo de permanencia de palanquilla dentro del rango dado en el apartado 7.3.1.
- Realizar control de composición química a las palanquillas que ingresan a la empresa como materia prima.
- Mantener las entradas de aire y de combustible a los valores calculados en apartados anteriores.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM A29. Grade Designations and Chemical Compositions of Carbon Steel Bars.2015. Pág. 3.

ASKELAND, Donal R., Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México, 1998. Pág.366

BRIZUELA, Eduardo. Combustión de combustibles líquidos, Combustión, unidad XII, Buenos Aires, Argentina: s.n., 2003, pág. 207.

BUTTS, Allison. Combustión, Metallurgical Problems, Chapter III, second edición, New York, USA: s.n., 1943, pág. 28, pág. 401.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna, McGraw Hill, 3ra edición, México, 2007. Pág.395.

JARAMILLO. O.A. Intercambiadores de calor. Centro de investigación en energía. Universidad nacional autónoma de México. 2007. Pág. 2-8.

MONTES, María. estudio teórico termodinámico y cinético de la oxidación a altas temperaturas de aleaciones binarias. Tesis profesional en ingeniería química industrial. Instituto Técnico nacional. Pag 20.

MORGAN ADVANCE MATERIALS. Ficha técnica de ladrillos refractarios, JM 32, conductividad térmica, página 2.

OZISIK, Necati M. Transferencia de calor. McGraw Hill, Universidad del estado de carolina del norte, U.S.A. Pág. 1-6.

PETROSERVICIOS CASANARE S.A.S, ficha técnica combustible fuel oíl N°6 para hornos y quemadores, pagina 3-4.

RAMIREZ, Jorge. Cinética de crecimiento, mecanismos de remoción y morfología del óxido de hierro en aceros laminados en una planta compacta de productos planos. Tesis de Doctorado en ingeniería de materiales. Universidad autónoma de nuevo león. 2005. Pag 11, Pag 108.

ROJAS, Sonia. Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos. Tesis profesional en ingeniería mecánica. Universidad Santo Tomas. 2014. Pág.30-34. Pág.38

WALPOLE, Ronald. Probabilidad y estadística para ingenieros. Sexta edición. Pág. 204.

INFOGRAFÍA

GLOSARIOS.SERVIDOR-ALICANTE. [En línea] 22 de 03 de 2017. [Citado el: 27 de 04 de 2018.] <https://glosarios.servidor-alicante.com/acero/cascarilla-de-laminacion>.

[On line] Disponible en:
http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2796/1/Dise%C3%B1o%20de%20un%20intercambiador%20de%20calor%20coraza_Albeiro%20Galvis_USBCTG_2015.pdf

[On line] Disponible en:
<https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/tablas-y-graficos-del-tema-intercambiadores-de-calor.pdf>

[On line] Disponible en:
<http://www.mepssa.com.co/historia.html>

[On line] Disponible en:
<http://www.morterahauck.com/fichas/quemadores/780.pdf>

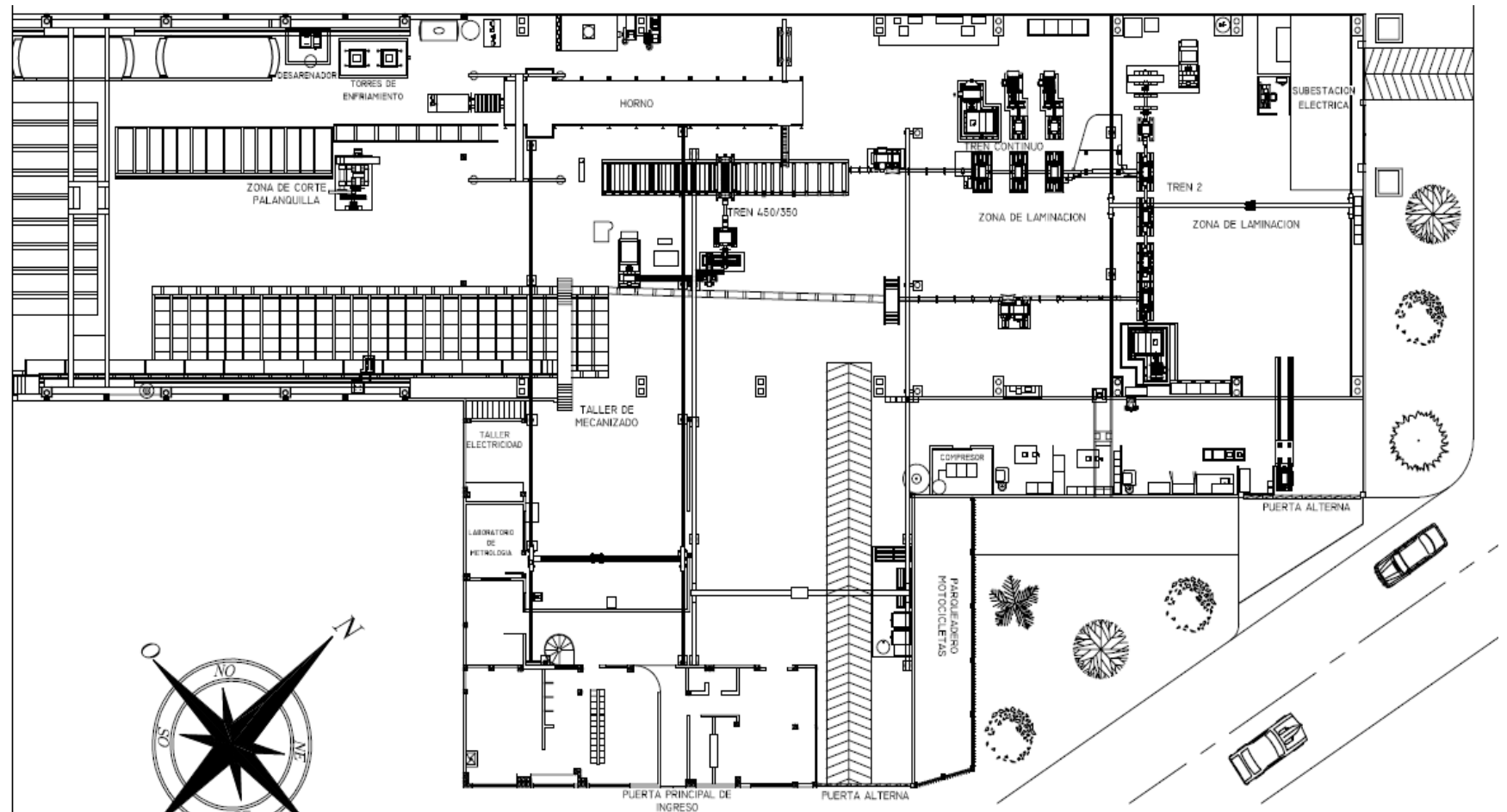
[On line] Disponible en:
http://www.tecnituberias.com/Spanish/Casing_files/TABLA%20ESPECIFICACION%20TUBERIA.pdf

[On line] Disponible en:
<https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/paipa/tiempo-146665/>

ANEXOS

ANEXO A. Plano de empresa Metales y Procesos del Oriente S.A.

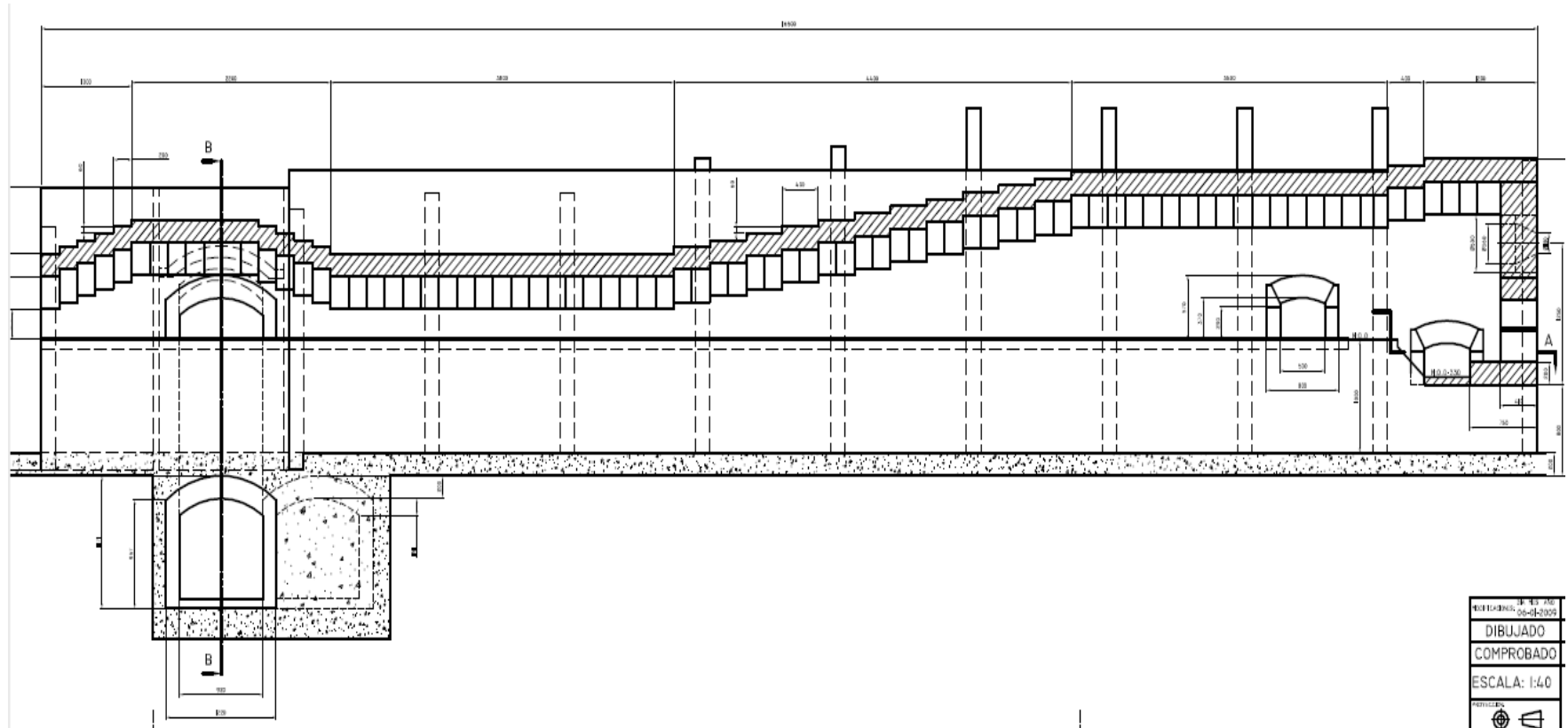
Figura 16. Esquema de partes del proceso de laminación en caliente de MEPSA



Fuente. ALFONSO Ernesto, Diseñador mecánico empresa MEPSA.

ANEXO B. Plano del horno de calentamiento de MEPSA

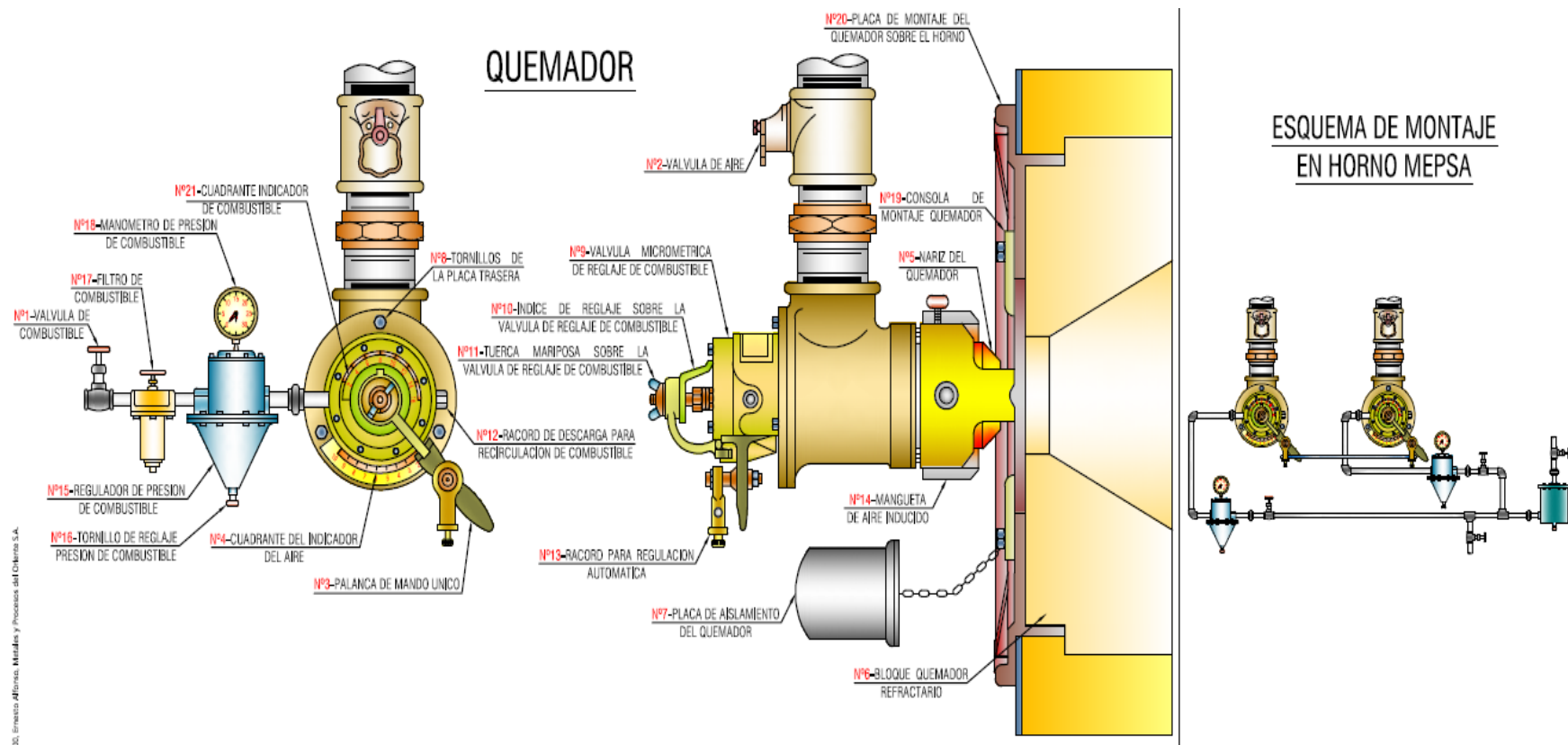
Figura 17. Plano estructural del horno de calentamiento



Fuente. ALFONSO Ernesto, Diseñador mecánico empresa MEPSA.

ANEXO C. Plano de los quemadores Hauck 780series

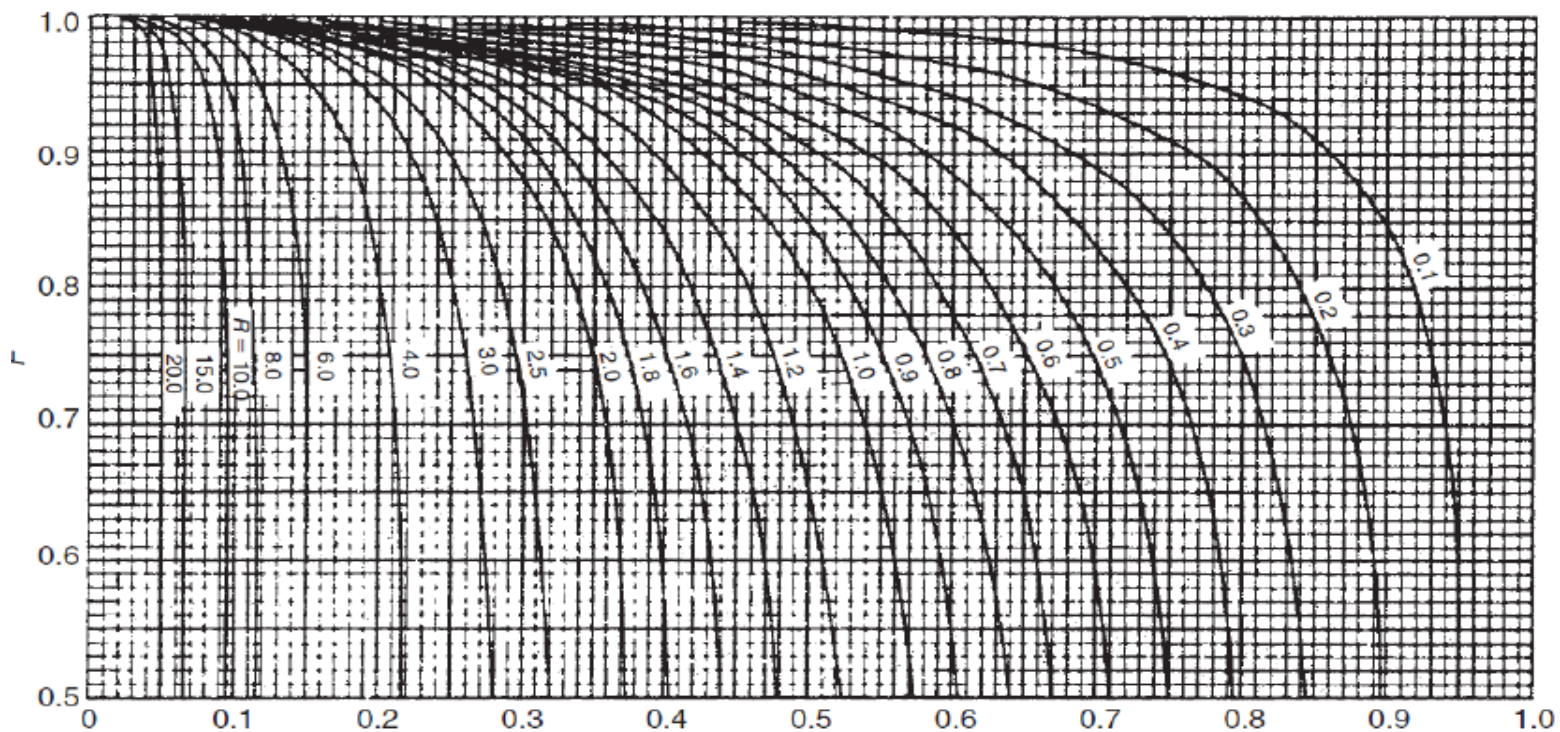
Figura 18. Esquema de los quemadores Hauck 780series



Fuente. ALFONSO Ernesto, Diseñador mecánico empresa MEPSA.

ANEXO D. Factor de corrección de temperatura para intercambiadores de calor

Gráfica 1. Gráfica para hallar factor de corrección de temperatura



Fuente: http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2796/1/Dise%C3%B1o%20de%20un%20intercambiador%20de%20calor%20coraza_Albeiro%20Galvis_USBCTG_2015.pdf

ANEXO E. Coeficientes globales de transferencia de calor para intercambiadores de calor

Tabla 12. Coeficientes globales de transferencia de calor

Fluido enfriándose. Unidades de carcasa y tubos con tubos lisos	Fluido calentándose	U _o ⁽¹⁾	
Rehervidores (cont.)			
Vapor de agua	Fondos del despojador	470	82
Vapor de agua	Fondos del estabilizador	650	115
Vapor de agua	Fondos torre reprocesadora	420	74
Vapores químicos ("Dowtherm")	Fondos torre reprocesadora	270	47
Vapor de agua	Fondos de GPL	400	70
Efluente del termoreactor ("Power former")	Fondos estabilizador del termoreactor ("Power former")	430-440	75-77
Vapor de agua	Fondos del despojador de K ₃ PO ₄	820	145
Vapor de agua	Fondos del regenerador de DEA	1360	240
Vapores químicos ("Dowtherm")	Fenol	370	65
Precalentadores			
Vapor de agua	Alim. a torre isobutanizadora	520	92
Vapor de agua	Alim. a torre reprocesadora	450-570	80-100
Vapor de agua	Alim. a torre desbutanizadora	620	110
Vapor de agua	Alim. a reactor hidrogenador	430-510	75-89
Fondo del estabilizador del termoreactor ("Power former")	Alimentación estabilizador termoreactor ("Power former")	270	47
Generadores de vapor			
Fondos de vacío	Agua de caldera	200	35
Recirculación de fondos de vacío	Agua de caldera	380-490	67-86
Lechada del fraccionador primario	Agua de caldera	170-310	30-55
Gas de chimenea	Aire	50-90	8-15
Efluente del reformador	Agua de caldera	260-340	45-60
Unidades con aletas (coeficientes basados en el área total externa)			
Nafta pesada	Agua (1.8 m/s (6 pie/s) en el ánulo)	140	25

Fuente: <https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/tablas-y-graficos-del-tema-intercambiadores-de-calor.pdf>

ANEXO F. Especificaciones técnicas para tubería de 1" cedula 40

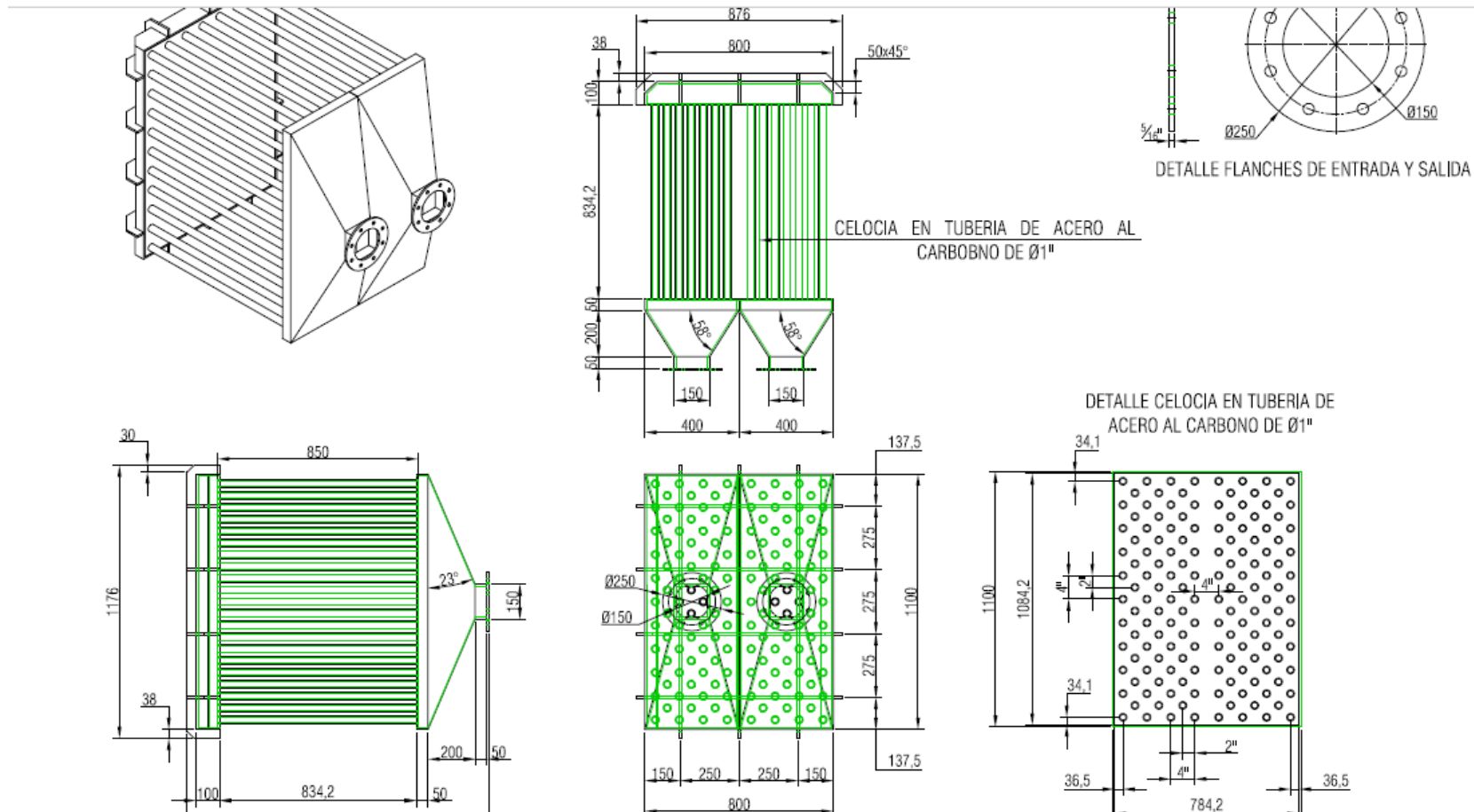
Tabla 13. Especificaciones técnicas para tuberías de acero al carbono

E S P E C I F I C A C I O N E S T U B E R I A L I N E P I P E								
Diámetro Nominal	Cédula Calibre	Diámetro Ext.		Diámetro Int.		Espesor		Peso Kg x Mt
		Pulg.	m.m.	Pulg.	m.m.	Pulg.	m.m.	
1/8"	40	0.405"	10.29	0.269"	6.83	0.068"	1.73	0.357
	70	0.405"	10.29	0.215"	5.46	0.095"	2.41	0.461
1/4"	40	0.540"	13.72	0.364"	9.25	0.088"	2.24	0.625
	80	0.540"	13.72	0.302"	7.67	0.119"	3.02	0.804
3/8"	40	0.675"	17.15	0.493"	12.52	0.091"	2.31	0.846
	80	0.675"	17.15	0.439"	10.74	0.126"	3.20	1.101
1/2"	40	0.840"	21.34	0.622"	15.80	0.109"	2.77	1.265
	80	0.840"	21.34	0.546"	13.87	0.147"	3.73	1.622
	160	0.840"	21.34	0.466"	11.84	0.167"	4.75	1.935
	XXS	0.840"	21.34	0.252"	6.40	0.294"	7.47	2.544
3/4"	40	1.050"	26.67	0.824"	20.93	0.113"	2.87	1.682
	80	1.050"	26.67	0.742"	18.85	0.154"	3.91	2.188
	160	1.050"	26.67	0.614"	15.80	0.218"	3.54	2.887
	XXS	1.050"	26.67	0.434"	11.02	0.308"	7.82	3.631
1"	40	1.315"	33.40	1.049"	26.64	0.133"	3.38	2.500
	80	1.315"	33.40	0.957"	24.31	0.179"	4.55	3.229
	160	1.315"	33.40	0.815"	20.70	0.250"	6.35	4.226
	XXS	1.315"	33.40	0.599"	15.21	0.358"	9.09	5.446

Fuente: http://www.tecnituberias.com/Spanish/Casing_files/TABLA%20ESPECIFICACION%20TUBERIA.pdf

ANEXO G. Planos de intercambiador de calor de coraza y tubos

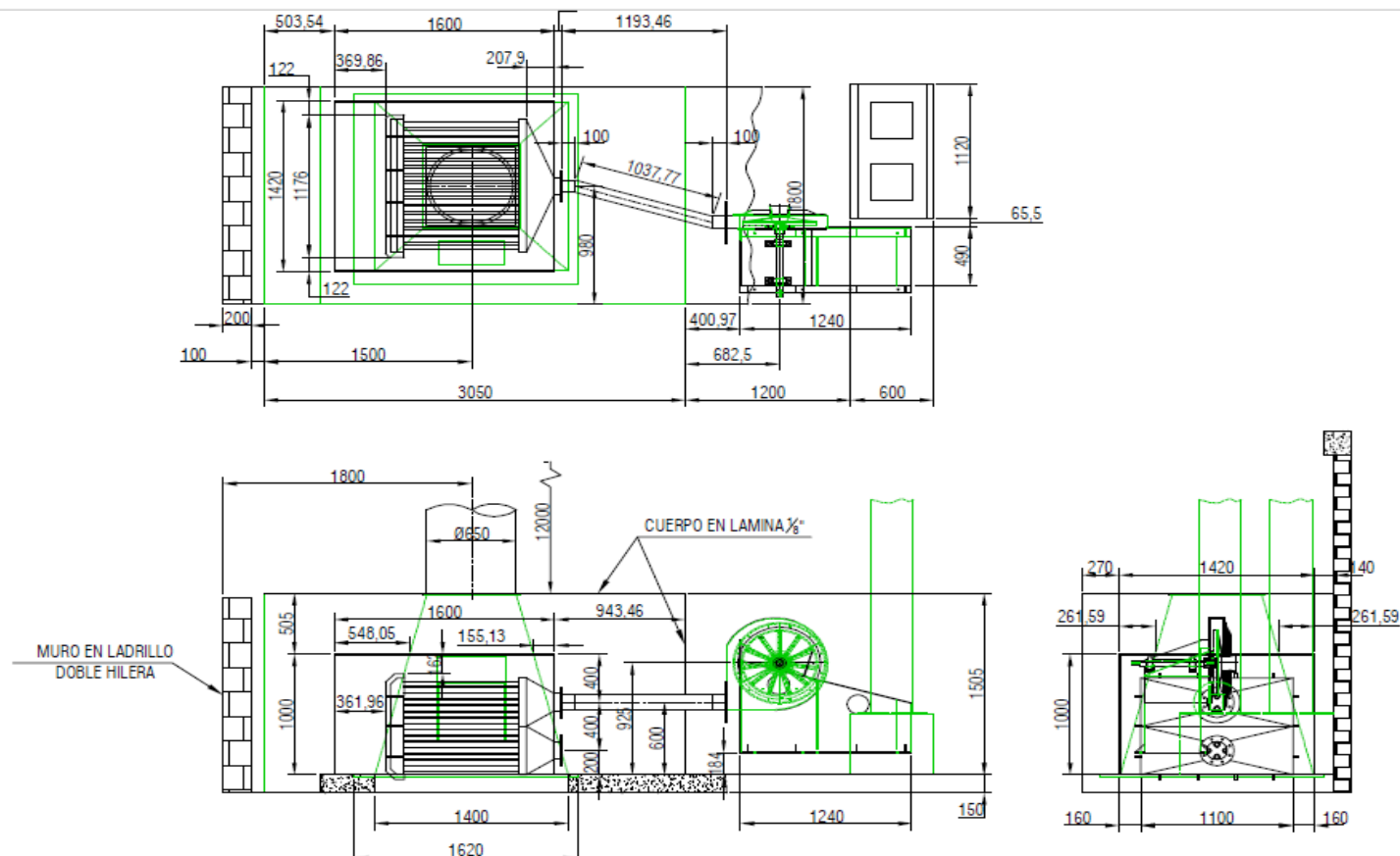
Figura 19. Planos de intercambiador de calor calculado.



Fuente. ALFONSO Ernesto, Diseñador mecánico empresa MEPSA.

ANEXO H. Planos de disposición del intercambiador de calor en la chimenea del horno

Figura 20. Planos del intercambiador de calor calculado dentro de la chimenea



Fuente. ALFONSO Ernesto, Diseñador mecánico empresa MEPSA.